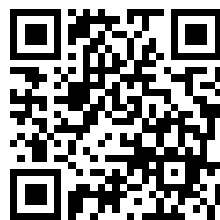

This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

GoogleTM books

<https://books.google.com>





A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

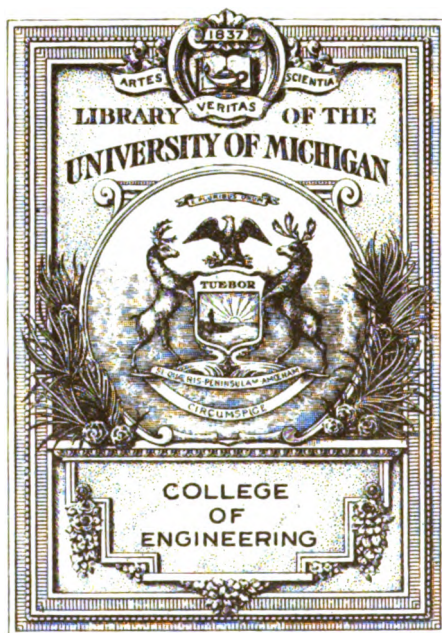
Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>

B 528132



QC
501
S67
I6

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS A ÉTÉ RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886

QUATRIÈME SÉRIE
TOME III. — ANNÉE 1923



SIEGE SOCIAL }
LABORATOIRE } 12 et 14, rue de Staël.
à Paris (15').

PARIS
SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
ÉDITEUR
12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e.

1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

ÉDITÉ
PAR LA
SOCIÉTÉ ANONYME
"REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
(au capital de 400 000 francs)
12, *Place de Laborde*, PARIS-8^e

JUL 13 1923

OME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 21.

JANVIER 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1922

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES.

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la Propulsion des Navires.

Puissance totale des turbines

installées en France

par la Compagnie Electro-Mécanique

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu
et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

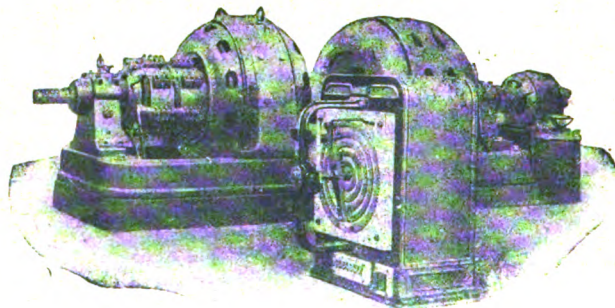
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

Eng.
Télg.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion mensuelle ordinaire du mercredi 3 janvier 1923 :
Admission de Membres titulaires, p. 1. — Membres décédés, p. 2. — Don à la
Société, p. 2. — Le rôle industriel futur des lampes électroniques de grande
puissance, (M. M. LEBLANC), p. 3. — Sur l'amortissement des alternateurs, (M.
BETHENOD), p. 29.

BIBLIOGRAPHIE, p. 40

IL Y A TRENTE ANS. p. 40.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 3 janvier 1923. ⁽¹⁾

Présidence de M. MARCEL BRILLOUIN

La séance est ouverte à 20 h 35.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Henry (Auguste-Félix), Ingénieur, chef du Laboratoire Delco, 8, rue Suzanne, à
Levallois (Seine). — Présenté par MM. Bossu et Leblanc.

Knudsen (Thorkil), Ingénieur, 22 Dronningeugade, Odemu (Danemark). —
Présenté par MM. Brillouin et Leblanc.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni
responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Morel (Gaston-Albert-Léon), Administrateur de l'Electro-Stock, 22, rue Coquillière, à Paris (1^{re}). — Présenté par MM. Bossu et Foulcher.

Stockvis (Louis-Gustave), Ingénieur, 42, avenue de la Bourdonnais, à Paris (7^e). — Présenté par MM. M. Blondin et Jouvion.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part des dons suivants :

Laboratoire de M. Blondel :

Un appareil à essayer les tôles ;

Un commutateur tournant.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. A. *Bochet* et du docteur John *Kelly*. Il exprime aux familles de ces membres les condoléances de la Société, et rappelle la carrière de M. A. Bochet à la Société française des Electriciens.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

LE RÔLE INDUSTRIEL FUTUR DES LAMPES ÉLECTRONIQUES DE GRANDE PUISSANCE

L'auteur s'excuse, tout d'abord, de faire une communication qui pourra paraître prématurée à beaucoup d'électriciens et susceptible d'éveiller plus d'espérances que de réalités: il s'agirait d'utiliser industriellement les tubes électroniques à trois électrodes pour la transformation d'un courant continu en courants alternatifs de fréquence quelconque, ces tubes étant toutefois modifiés de façon à produire des ions, ce qui se réaliserait très facilement à l'aide de lampes à vapeur de mercure. Cet appareil, qu'il appelle un robinet électrique, associé à une soupape électrique qui effectuera la transformation inverse, c'est-à-dire de courants alternatifs en courant continu, permettrait de réaliser des combinaisons très intéressantes, par exemple, des applications à la traction sur voie ferrée ou sur route.

M. Maurice LEBLANC. — « On rendrait un grand service aux électriciens en faisant un appareil industriel de la lampe électronique de *de Forest* à trois électrodes : anode, cathode et grille intermédiaire.

» Ce serait un véritable *robinet électrique*, avec lequel on pourrait transformer un courant continu en courants alternatifs de fréquence quelconque, aussi haute ou aussi basse que l'on voudrait et que l'on pourrait faire varier à volonté.

» Si sa grille était toujours franchement positive ou négative par rapport à sa cathode, le robinet serait toujours ouvert en grand ou complètement fermé et jamais étranglé. Les pertes de charge y seraient très petites et les transformations effectuées par son intermédiaire auraient un excellent rendement. Sa manœuvre n'exigerait d'ailleurs aucun travail appréciable.

» Nous possédons déjà des soupapes électriques permettant de transformer des courants alternatifs en courant continu de tension aussi élevée que l'on veut.

» Le jour où nous disposerons à la fois de la soupape et du robinet, nous pourrions facilement produire et utiliser des courants continus à très haute tension. Or, ceux-là sont, de beaucoup, les meilleurs agents de transmission de l'énergie.

» Nous pourrions aussi réaliser d'autres problèmes intéressants relatifs à la propulsion des véhicules sur voie ferrée ou sur route, comme nous le verrons plus loin.

» Les ingénieurs de la Western Co, M. Houskeeper, en particulier, ont fait récemment de grands progrès dans la construction de ces lampes ; M. Houskeeper a d'abord trouvé un moyen simple de faire passer d'assez gros conducteurs en cuivre à travers une masse de verre, en obtenant un joint parfaitement étanche. C'est

que le cuivre se soude au verre, en formant avec lui une combinaison chimique, et ces deux corps adhèrent énergiquement l'un à l'autre.

» Il suffit de donner au conducteur la forme d'un ruban mince effilé sur ses bords (fig. 1). En se refroidissant, le cuivre tend à se contracter davantage que le verre et demeure tendu. L'adhérence des deux corps suffit pour les maintenir dans cet état et, si le ruban est suffisamment mince, le verre supporte la compression qu'il subit.

» On a pu ainsi faire passer, à travers le verre, des rubans de 25 mm de largeur capables de débiter des courants de 150 à 200 ampères. Ces scellements sont demeurés étanches après avoir été plongés dans l'air liquide, puis portés à la température de 350° C et cela un grand nombre de fois.

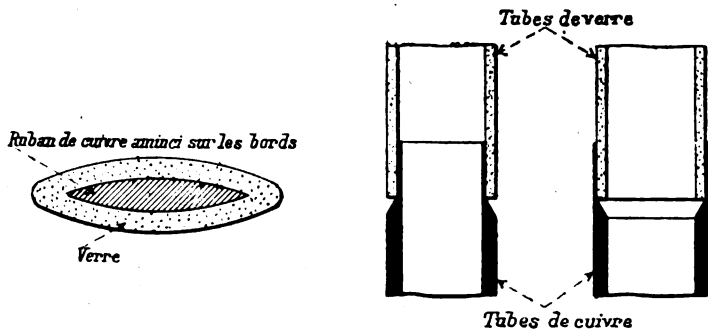


Fig. 1.

Fig. 2.

» M. Houskeeper a scellé de la même manière, dans des anneaux de verre, des disques de cuivre forts très effilés, dont l'épaisseur au centre était de 2,5 mm.

» Enfin, il a réussi à souder bout à bout des tubes de verre et des tubes de cuivre de grands diamètres, ce qui est un résultat technique de la plus haute importance. Il emboîte simplement leurs extrémités, après avoir aminci le tube de cuivre dans la région où il était en contact avec le verre (fig. 2). Peu importe que le cuivre enveloppe le verre ou soit enveloppé par lui.

» Ce procédé a permis d'obtenir des enveloppes étanches en soudant une éprouvette en verre à une pièce de cuivre emboutie comme une gargousse d'artillerie. Cette dernière servait d'anode, et il

était facile de la refroidir avec un courant d'eau et d'absorber la chaleur produite par un bombardement intense.

» Les ingénieurs de la Western C° ont fait ainsi des lampes à trois électrodes, pour la radiotélégraphie, qui, fonctionnant comme hétérodynes, ont fourni 100 kilowatts à 10 000 volts.

» L'anode a 89 mm de diamètre et 360 mm de hauteur. Le filament est un fil de tungstène de 1,5 mm de diamètre et de 1,62 m de longueur, replié en zig-zag. Le courant de chauffage est de 91 ampères et absorbe 6 kilowatts. Enfin, la grille est faite d'un fil de molybdène enroulé en hélice autour d'une cage d'écureuil du même métal.

» Mais cette lampe est difficile à construire parce qu'il faut souder l'éprouvette en verre et l'embouti en cuivre, alors que le filament, la grille, leurs supports et les conducteurs qui y aboutissent sont assemblés à leur intérieur et reliés à l'éprouvette. On risque fort de déformer tout le système en ramollissant le verre. Nous verrons tout à l'heure comment cet inconvénient peut être évité.

» Il était difficile aussi d'obtenir le vide voulu dans la lampe en enlevant tout le gaz occlus dans les pièces métalliques, que l'on ne pouvait porter à une température élevée sans risquer de nouvelles déformations.

» Mais les ingénieurs de la Western C° ont observé que, si l'on chauffait fortement, dans le vide, une pièce quelconque, les gaz occlus en elle se dégageaient rapidement ; mais si, une fois refroidie, on la soumettait de nouveau à la pression atmosphérique, l'air ne rentrait que lentement dans ses pores.

» Ils font subir ce traitement à toutes les pièces entrant dans la constitution de la lampe et les laissent refroidir dans le vide, c'où on ne les sort qu'au moment de les assembler. Si on les monte rapidement et si on vide la lampe aussitôt après, toutes ces pièces n'ont eu le temps de condenser que très peu de gaz, et l'on obtient facilement le degré de raréfaction désiré.

» Dans ces conditions, on doit pouvoir réaliser un robinet électrique à électrons industriel, dont le débit puisse varier dans les plus grandes limites.

» La figure 3 montre comment on peut le concevoir.

» La cathode A est un cylindre métallique, à l'intérieur duquel une spirale B est portée à l'incandescence par une source d'élec-

tricité locale. Elle chauffe la cathode par rayonnement et la température de celle-ci est alors indépendante du débit du robinet, condition essentielle.

» La grille C est constituée par une cage d'écureuil métallique, sur laquelle est enroulé en hélice un fil fin de molybdène.

» La cathode et la grille sont maintenues par des pièces en la- vite a a, b b..., en forme de roues posées à plat.

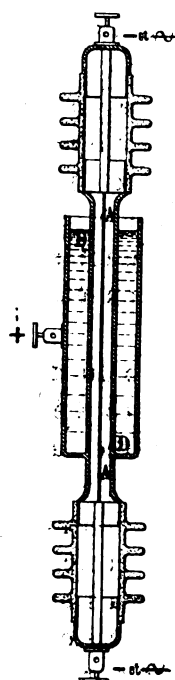


Fig. 3.

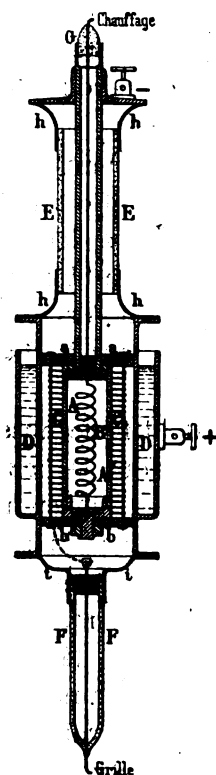


Fig. 4.

» Enfin, l'anode D cylindrique fait partie de l'enveloppe de l'appareil. Elle est métallique et refroidie par un courant d'eau.

» Dans la constitution de l'enveloppe entrent un tube E, une éprouvette F et un bouchon G, qui sont en verre. Le tube et l'éprouvette isolent de l'anode les prises de courant de la cathode et de la grille. Le bouchon isole l'entrée du courant de chauffage de la spirale B de la cathode : il n'a à supporter qu'une faible tension. Au contraire, le tube et l'éprouvette, devant généralement en supporter de très fortes, auront une grande longueur.

» Le tube E est terminé à ses deux extrémités par deux collerettes en cuivre h h, à rebords plats, qui lui sont soudées tout d'abord. De même, la base de l'éprouvette F est soudée à une collerette en cuivre i. Quant au bouchon G, il est soudé à l'extrémité du tube central qui porte la cathode.

» De cette manière, au moment du montage, on n'a plus à souder entre elles que des pièces de cuivre qui, en service, pourront être maintenues froides. Les soudures pourront être faites à l'étain et on ne courra aucun risque de déformation.

» La cathode de ce robinet est constituée par un cylindre, au lieu d'un filament, et cela permet de lui donner une bien plus grande surface.

» Or, il est reconnu que la masse m de métal d'une cathode, qui se sublime par seconde et par centimètre carré, est une fonction de sa température absolue T , représentée par une formule de même forme que celle de Richardson, c'est-à-dire que, si l'on désigne par a et b deux constantes, on a : $m = a T^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{b}{T}}$.

» L'usure d'une cathode est donc proportionnelle à son débit par centimètre carré, qu'il convient, dès lors, de rendre aussi petit que possible.

» D'autre part, la charge d'espace, dans les environs immédiats de la cathode, croît avec son débit par centimètre carré. A égalité de débit total, il faudra donc développer, entre l'anode et la cathode, pour surmonter cette charge d'espace, une tension d'autant plus grande que la densité du courant, à la surface de la cathode, le sera elle-même. Cela augmentera l'intensité du bombardement subi par l'anode et, pour conserver le même rendement, il faudra augmenter aussi la tension efficace des courants qui franchiront le robinet. Or, dans bien des cas, surtout en vue d'applications immédiates, il y aurait intérêt à rendre cette tension modérée.

» La cathode devra être en un métal perméable aux électrons à une température aussi peu élevée que possible. Si on recouvrait ce métal d'un oxyde, celui-ci, en se sublimant lentement, pourrait se déposer sur l'anode refroidie et y former une couche d'un vernis isolant. Cet inconvénient, nul dans les lampes où seul un filament de surface négligeable par rapport à celle de l'anode est enduit

d'oxyde, deviendrait grave lorsque la surface de la cathode différerait peu de celle de l'anode.

ROBINET ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

» Les ingénieurs de la General Electric C^o viennent de réaliser un appareil de grande puissance : 1 000 kilowatts, mais à 220 000 volts, d'un volume et d'un poids extrêmement petits par rapport à sa puissance. (Il ne pèserait que 15 kg!). Son principe est tout différent de celui de la lampe à trois électrodes, mais il peut aussi servir à faire un robinet électrique.

» Nos renseignements à son sujet sont encore très vagues et nous ignorons ses dispositions particulières. Celles représentées sur la figure 4 sont supposées. Nous croyons cependant en savoir assez pour nous rendre compte de son fonctionnement.

» Il comporterait une cathode incandescente constituée par un filament rectiligne A (fig. 4) en tungstène de 5 mm de diamètre. Son anode D serait constituée par un cylindre métallique concentrique au filament et refroidi extérieurement par un courant d'eau. Un vide poussé aussi loin que possible régnerait entre l'anode et la cathode.

» Il n'y aurait pas de grille intermédiaire, mais, en même temps que l'on maintiendrait une différence de potentiel constante de 220 000 volts entre l'une des extrémités du filament et l'entrée du circuit d'utilisation, dont la sortie serait reliée à l'anode, on ferait passer un courant alternatif de 1 800 ampères à la fréquence de 10 000 p/s dans le filament, en dépensant pour cela 20 kilowatts. Les variations du champ magnétique entre l'anode et la cathode détermineraient alors 20 000 interruptions par seconde du courant dans le circuit d'utilisation, et cela permettrait de faire émettre par une antenne 20 000 ondes successives par seconde. Le rendement du système serait de 0,7.

» Soit m la masse d'un électron et e sa charge.

» Si les champs électrique et magnétique, de directions perpendiculaires, développés entre le filament et le tube étaient uniformes et avaient des intensités H et I , tout électron émis par le filament décrirait une cycloïde comprise dans un plan méridien du

système : elle serait tangente au filament et ses sommets seraient à une distance de celui-ci égale à $\frac{m}{\varepsilon} \frac{H}{I}$.

» Soit λ la distance du filament au tube.

» Tant que l'on aurait $\lambda < \frac{m}{\varepsilon} \frac{H}{I}$, l'électron rencontrerait le tube et serait absorbé par lui. Un courant irait alors du tube au filament.

» Mais, dès que l'on aurait $\lambda > \frac{m}{\varepsilon} \frac{H}{I}$, l'électron, en tourbillonnant, se déplacerait parallèlement à l'axe du système, dans un sens ou dans l'autre, suivant le signe de l'intensité I , jusqu'à ce qu'il sortit du champ électrique, c'est-à-dire de la région recouverte par le tube. Il retomberait alors sur le filament.

» Dans le cas actuel, les champs ne sont pas uniformes, non seulement parce que les diamètres du tube et du filament diffèrent beaucoup, mais aussi à cause de la charge de l'espace compris entre le filament et le tube, due aux électrons libres qui s'y meuvent. D'autre part, ceux-ci, en se déplaçant parallèlement à l'axe, modifient le champ magnétique.

» Développer une théorie complète du phénomène serait très difficile, et elle nous ferait seulement connaître la courbe qui remplacerait la cycloïde précédente.

» Quand le champ magnétique sera nul, les électrons issus du filament se déplaceront suivant des rayons normaux à l'axe du système. A mesure que l'intensité du courant exciteur augmentera, chaque électron sera sollicité par une force normale à sa vitesse de plus en plus grande et sa trajectoire se courbera de plus en plus.

» Lorsque cette intensité positive ou négative aura acquis une valeur absolue égale à i (fig. 5), les électrons cesseront encore d'atteindre le tube et tout courant sera interrompu entre celui-ci et le filament. Alors, comme on le voit sur la figure 5, il y aura émission de courant pendant que l'intensité du courant exciteur variera de $-i$ à $+i$ ou de $+i$ à $-i$, soit deux émissions par période du courant exciteur.

» En associant deux tubes semblables à celui de la figure 4, mais en les faisant exciter, l'un par un courant d'intensité $j = a \sin \alpha t$, l'autre par un courant d'intensité $j' = a \cos \alpha t$, on constituerait un système capable d'engendrer un courant alterna-

tif de pulsation 2 aux dépens de l'énergie fournie par une source de force électromotrice constante.

» Comme on le voit sur la figure 5, les émissions de courant produites par les deux tubes seraient déphasées de un quart de la période des courants excitateurs. Considérons maintenant le montage représenté sur la figure 6.

» Les deux tubes sont figurés en I et II. Le premier est excité par un courant d'intensité $j = a \sin \alpha t$; le second, par un courant d'intensité $j' = a \cos \alpha t$. Leurs deux filaments sont reliés au

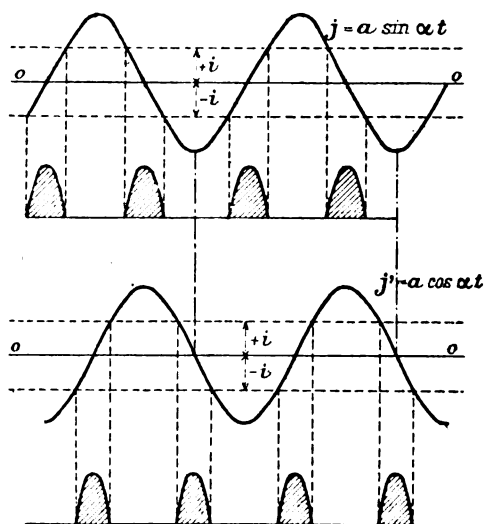


Fig. 5.

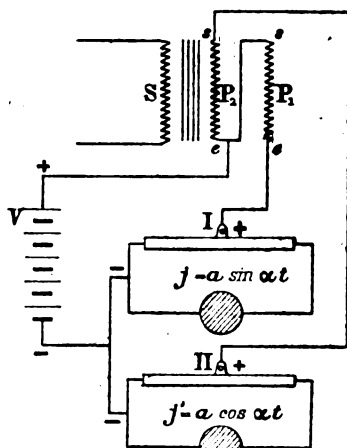


Fig. 6.

pôle — de la source de force électromotrice constante V . T est un transformateur comprenant un circuit secondaire S qui dessert le réseau d'utilisation du courant alternatif et deux circuits primaires identiques P_1 et P_2 , dont les points d'entrée et de sortie sont indiqués par les lettres e et s .

» Le point d'entrée du circuit P_2 et le point de sortie du circuit P_1 sont reliés au pôle $+$ de la source V . Le point d'entrée du circuit P_1 l'est à l'anode du tube I et le point de sortie du circuit P_2 , à l'anode du tube II.

» Dans ces conditions, les choses se passent comme si le transformateur ne comportait qu'un seul circuit primaire, parcouru dans un sens par les ondes provenant du tube I et dans l'autre sens, par celles provenant du tube II.

» Le courant induit dans le circuit secondaire est alors un cou-

rant alternatif, dont l'intensité varie comme le représente la figure 7.

» On pourrait remplacer, dans le montage précédent, les tubes I et II par deux lampes à trois électrodes dont les filaments seraient maintenus incandescents par des sources de courant continu locales qui remplaceraient les sources de courants alterna-

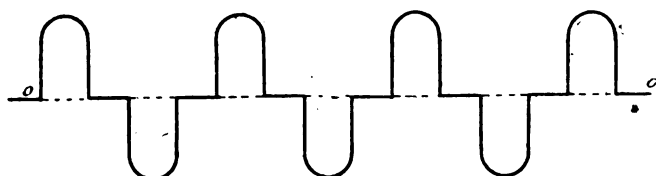


Fig. 7.

tifs d'intensité j et j' . Les différences de potentiels développées entre les grilles et les cathodes de ces lampes devraient varier comme le montrent les lignes brisées de la figure 8.

» On développerait dans le circuit d'utilisation un courant alternatif dont la fréquence serait la même que celle des variations de la charge des grilles.

» Ce nouvel appareil est très intéressant et paraît plus facile à construire que la lampe à trois électrodes de la figure 3.

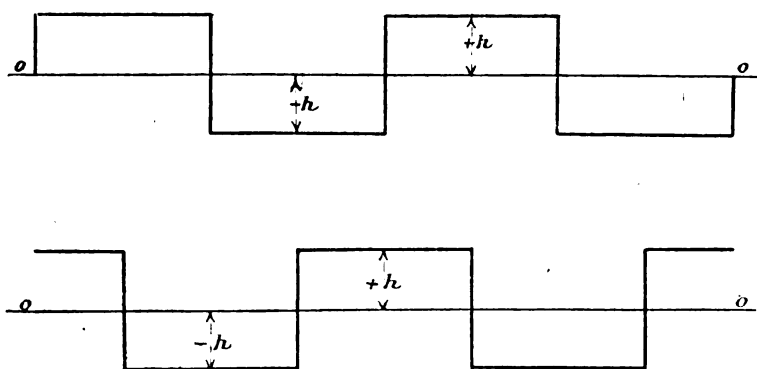


Fig. 8.

» Cependant, nous ne pensons pas qu'il puisse lui équivaloir.

» En effet, le défaut capital de tous les appareils à électrons réside dans la charge de l'espace compris entre l'anode et la cathode effectuée par les électrons qui vont de l'une à l'autre. Pour la surmonter, il faut développer une différence de potentiel proportionnelle au carré de la distance de ces deux électrodes. La

perte d'énergie qui en résulte est ainsi proportionnelle au carré de cette distance, que l'on doit réduire autant que possible.

» Dans la lampe à 3 électrodes, il suffit d'éviter toute décharge entre l'anode et la cathode, alors que, la grille étant rendue négative par rapport à celle-ci, aucun courant ne traverse la lampe. Or, la rigidité électrostatique du vide que l'on doit faire dans les appareils à électrons est d'environ 10^6 volts par centimètre. Il sera donc toujours possible de rapprocher beaucoup l'anode de la cathode, malgré la présence de la grille. Ce n'est qu'une question de construction.

» Dans le nouvel appareil, au contraire, il faut que la distance de l'anode à la cathode soit assez grande pour que, sous l'influence d'un champ magnétique, les électrons cessent de pouvoir atteindre l'anode. Or, on ne peut rendre ce champ très intense, puisque ses lignes de force doivent se fermer entièrement dans le vide.

» On sera sans doute conduit à écarter davantage l'anode de la cathode, dans cet appareil, que dans les lampes à grille.

» D'autre part, le nombre des électrons accumulés entre le tube et le filament sera d'autant plus grand que leurs trajectoires seront plus courbées.

» Enfin, lorsque la grille d'une lampe à trois électrodes est rendue négative et qu'il ne passe aucun courant entre l'anode et la cathode, elle refoule dans celle-ci les électrons qui tendent à en sortir. Dans le nouvel appareil, le filament continue à émettre des électrons, pendant que le courant est interrompu ; ils demeurent dans l'espace compris entre les deux électrodes, où ils tourbillonnent, sous l'influence du champ magnétique.

» Tout contribue donc à rendre très forte la charge d'espace du nouvel appareil et on est obligé de dépenser beaucoup de travail pour la surmonter. C'est ainsi que, tout en se servant d'une source de force électromotrice constante à tension extrêmement élevée, on n'a pu obtenir qu'un rendement de 0,7. Le bombardement du tube absorberait 680 kilowatts.

» De même que, pour avoir un bon rendement avec une lampe à trois électrodes, il convient de faire varier brusquement la charge de la grille, de même avec le nouvel appareil, il conviendrait de laisser nul le courant excitateur pendant qu'un courant irait du tube au filament, et de lui faire acquérir ensuite brusquement une valeur suffisante pour interrompre le débit. Son inten-

sité devrait varier comme le montre la ligne brisée de la figure 9.

» Mais, s'il est facile de faire varier brusquement la charge d'une grille, dont la capacité est presque nulle, il n'en est pas de même de l'intensité d'un courant appelé à franchir un circuit dont la self-induction est très appréciable.

» Nous ne croyons donc pas possible d'obtenir avec le nouvel appareil le même rendement qu'avec une lampe à trois électrodes, celle-ci fonctionnant, bien entendu, non comme hétérodyne, mais comme simple robinet.

» Lorsqu'il s'agira de desservir des postes de radiocommunication où le service rendu peut se payer cher, le rendement de 0,7 sera très acceptable. Mais, s'il s'agissait d'une distribution d'électricité où l'énergie serait transmise par des courants continus de très haute tension que l'on devrait transformer à l'ar-



Fig. 9.

rivée en courants alternatifs de fréquence usuelle, il faudrait avoir un rendement beaucoup plus élevé, que seules les lampes à grille nous paraissent susceptibles d'atteindre.

» Même avec ces dernières, munies de cathodes à grande surface, la charge d'espace oblige à développer une tension de l'ordre du millier de volts entre l'anode et la cathode, pendant que le courant passe.

» Pour que le rendement soit très élevé, il faut que la tension des courants utilisés se mesure en dizaine de milliers de volts.

» Toutefois, dans bien des applications, on pourrait se contenter de tensions bien moindres. Il faudrait alors réduire la charge d'espace.

» Celle-ci devient très faible si le courant est transmis par des ions, au lieu de l'être par des électrons. C'est pourquoi nous avons cherché à résoudre les problèmes que nous avons en vue avec des appareils à ions et nous nous sommes proposé d'employer des lampes à cathode de mercure, car celles-ci ont l'avantage

énorme de se reconstituer indéfiniment, les vapeurs qu'elles émettent leur revenant à l'état liquide, après s'être condensées sur les parois de la lampe.

LES ROBINETS ÉLECTRIQUES A VAPEUR DE MERCURE. LEURS APPLICATIONS

» La figure 10 représente un robinet à vapeur de mercure. Il se compose d'une ampoule soigneusement purgée d'air où sont disposées une anode *a* en fer ou en charbon, une grille métallique *b* et une cathode *c* constituée par un globule de mercure. Une anode auxiliaire *d* permet de faire jaillir continuellement un arc entre elle et la cathode, afin de maintenir l'appareil toujours amorcé.

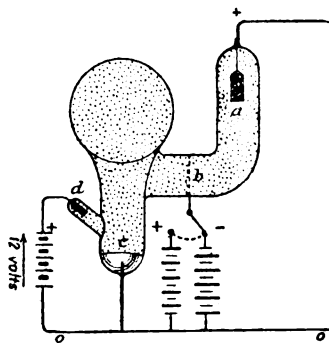


Fig. 10.

» Un courant ne peut traverser le robinet qu'en allant de l'anode *a* à la cathode *c*.

» Mais il y a autant d'ions positifs allant dans un sens que d'ions négatifs allant dans l'autre. Alors l'espace compris entre l'anode et la cathode ne se charge plus et une douzaine de volts suffisent pour y faire passer des centaines d'ampères.

» Si l'on rend la grille négative par rapport à la cathode, pendant qu'un courant passe, elle se recouvre d'une gaine d'ions positifs : ils annulent l'effet de sa charge et l'on n'interrompt pas le courant, comme il arriverait avec un robinet à électrons. Mais si, en agissant sur le circuit extérieur, on interrompt ce courant, pendant un temps qui peut être extrêmement court, la grille étant négative, celle-ci résorbe les ions positifs déposés sur elle et empêche ensuite l'émission d'électrons par la cathode, comme dans un robinet à électrons.

» On ne peut plus rétablir le courant, tant que la grille demeure négative. Il faut, pour cela, rendre sa charge nulle ou positive.

» Nous avons constaté ces propriétés en décembre 1915, à la station de la Tour Eiffel. En voici deux applications.

» I. TRANSFORMATION D'UN COURANT CONTINU EN COURANT ALTERNATIF DE FRÉQUENCE ÉLEVÉE (fig. 11). — Un circuit comprend : une source de force électromotrice constante E ; 2° une bobine ayant un coefficient de self-induction l s'opposant à toute variation appréciable de l'intensité I du courant débité par la source E , pendant la durée d'une période du courant alternatif que l'on veut produire ; 3° le circuit primaire P d'un transformateur, dont le circuit secondaire S dessert le réseau d'utili-

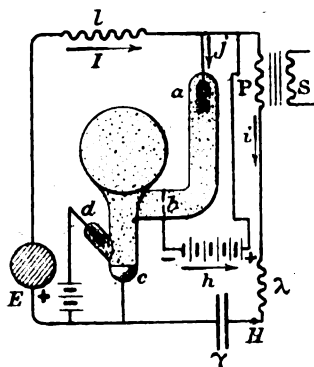


Fig. 11.

sation ; 4° un résonateur composé d'une bobine ayant un coefficient de self-induction λ et d'un condensateur de capacité γ . Entre la sortie de la bobine et l'entrée de la source E , on monte, en dérivation, un des robinets précédents maintenu amorcé et on relie sa grille à l'anode a par un circuit contenant une source de force électromotrice h .

» Supposons la cathode c au potentiel zéro et désignons par H le potentiel à l'entrée du condensateur ; par i , l'intensité du courant dans la bobine λ et par j , celle du courant traversant le robinet ; celle du courant qui ira à la grille sera inappréciable.

» Si, une fois le régime établi, l'intensité j s'annule, la grille est alors négative, le courant ne peut se rétablir dans le robinet et le courant d'intensité I va charger le condensateur. Mais, dès que l'on a $H = h$, la grille cesse d'être négative et le robinet met en

court-circuit le résonateur, dont le courant de décharge oscille, en s'amortissant, avec une fréquence f peu différente de $\frac{1}{2\pi\sqrt{\gamma k}}$

Si l'énergie $\frac{1}{2}\gamma H^2$ est supérieure à $\frac{EI}{f}$, l'intensité égale i redevient à I et l'intensité j devient nulle, alors que la grille est négative, et le demeure jusqu'à ce que le potentiel H soit redevenu égal à h .

» Nous produisons ainsi des ondes entretenues : l'intensité i et le potentiel H varient, comme le montrent les courbes de la figure 12.

» Les ondes positives ont leur crête arasée, mais elles sont d'autant moins déformées que la quantité d'énergie $\frac{1}{2}\lambda I^2$ est plus grande par rapport à la quantité $\frac{1}{2}\gamma H^2$. Si celle-ci est petite,

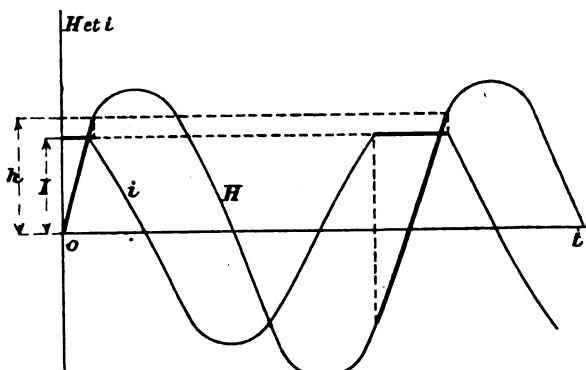


Fig. 12.

par rapport à la première, la tension aux bornes du réseau d'utilisation est constante.

» Posons, par exemple, $E = 500$ volts, $I = 20$ ampères, $f = 20\,000$ p.s. Nous devons faire γH^2 égal à 1 joule et, afin que les ondes soient peu déformées, faire λI^2 égal à 4 joules. Il en résulte $\lambda = 0,01$ henry, $\gamma = 0,00633$ microfarad et $h = 12\,566$ volts.

» Pour que cette tension puisse faire éclater un arc entre l'anode a et la grille, il faut rendre le circuit de grille très résistant. Toutefois, si l'on exagérât, la grille ne pourrait plus résorber presque instantanément les ions positifs qui la recouvriraient, au moment où l'intensité j s'annulerait, ainsi que les ions encore libérés dans son voisinage par l'agitation moléculaire.

laire ou les rayons ultra-violetes émis par la cathode. On évitera toute difficulté en refroidissant la grille par un courant d'eau ou d'huile, ce qui permettra de réduire suffisamment la résistance de son circuit sans qu'elle puisse, en s'échauffant, se transformer en cathode. La figure 13 montre comment on peut la disposer pour cela.

» Ce mode de transformation doit être d'un très bon rendement. En effet, le robinet est toujours ouvert en grand ou complètement fermé. Nous n'avons pu encore expérimenter ce mode de production des courants alternatifs de fréquence élevée, mais nous avons voulu exposer, dès à présent, son principe, parce qu'il se combinera avec le mode de transformation suivant, déjà réalisé, pour constituer un nouveau système de traction électrique que nous décrirons plus loin.

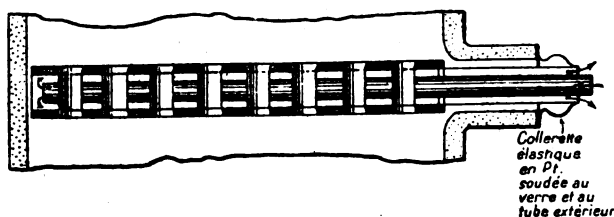


Fig. 13.

» II. TRANSFORMATION DE COURANTS ALTERNATIFS DE FRÉQUENCE ÉLEVÉE EN COURANTS ALTERNATIFS DE FRÉQUENCE USUELLE ET VARIABLE A VOLONTÉ. — L'appareil employé (figure 14) se compose : 1° d'un transformateur A, dont le circuit primaire P reçoit le courant à transformer. Il a deux circuits secondaires S_1 et S_2 , identiques, mais connectés différemment: le point d'entrée du premier et le point de sortie du second sont reliés à un point neutre O ; 2° de quatre robinets semblables à celui que l'on vient de décrire 1, 2, 3 et 4. L'anode du robinet 1 et la cathode du robinet 4 communiquent avec le point de sortie du circuit S_1 . L'anode du robinet 2 et la cathode du robinet 3 communiquent avec le point d'entrée du circuit S_2 . Enfin, les cathodes des robinets 1 et 2 et les anodes des robinets 3 et 4 communiquent avec un conducteur XX et le circuit d'utilisation R est branché entre ce conducteur et le point neutre O.

» On dispose, pour charger les grilles, d'un petit transformateur B, dont le circuit primaire p_1 reçoit du courant fourni par

une batterie Ac , mais périodiquement inversé par un commutateur C . La fréquence du courant ainsi obtenu est égale à la vitesse de rotation de ce commutateur. Le transformateur B a trois circuits secondaires : $S_{1,2}$, S_3 , S_4 . Le circuit $S_{1,2}$ est branché entre les grilles réunies en parallèle des robinets 1 et 2 et le conducteur XX : il les rend simultanément positives ou négatives par rapport à leurs cathodes. Les circuits S_3 et S_4 sont branchés, le premier entre la grille et la cathode du robinet 3 et le second entre celles du robinet 4. Les connexions sont faites de façon que les grilles des robinets 1 et 2 soient positives, pendant que celles des robinets 3 et 4 sont négatives, et réciproquement.

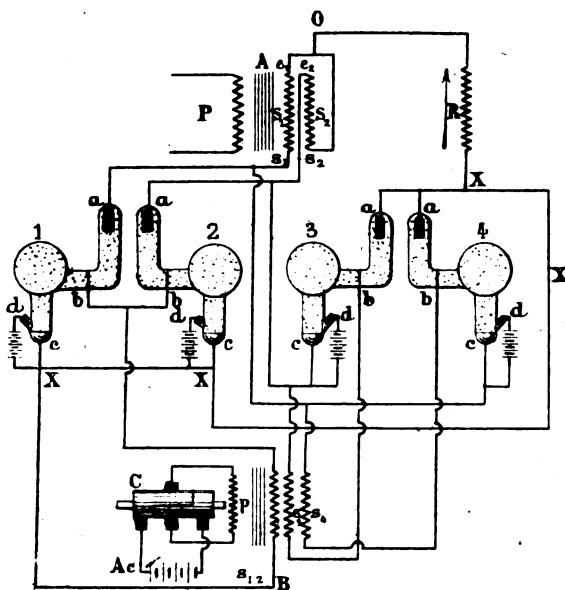


Fig. 14.

» Supposons positives les grilles des robinets 1 et 2 au moment où l'on ferme le circuit R . Un courant ne peut le parcourir que dans le sens de la flèche de la figure 14. Il se fermera en traversant soit le robinet 1 et le circuit S_1 , soit le robinet 2 et le circuit S_2 .

» Si le circuit R n'a aucune self-induction, l'intensité du courant variera dans les circuits S_1 , S_2 et R , comme le montre la figure 15. S'il en a, elle croîtra graduellement, comme il est aussi montré sur cette figure.

» Rendons maintenant négatives les grilles des robinets 1 et 2 et positives celles des robinets 3 et 4. Si le circuit R a de la

self-induction, le courant qui le traverse ne peut changer immédiatement de sens en s'annulant et, tant qu'il ne l'a pas fait, il ne peut franchir les robinets 3 et 4, ne pouvant aller de leur cathode à leur anode.

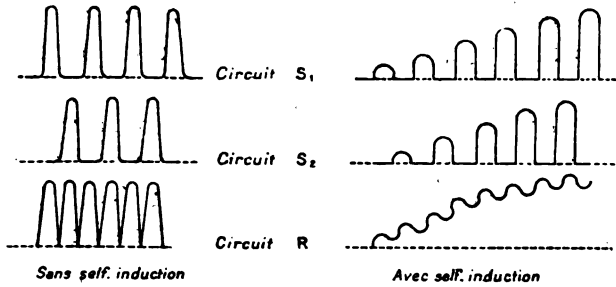


Fig. 15.

» Au moment de l'interversion, il traversait, par exemple, le robinet 2. Il ne peut plus se rétablir dans le robinet 1, dont la grille a été rendue négative alors qu'il n'y passait pas de courant. Il continue donc à traverser le robinet 2 et le circuit S₂. Mais la force électromotrice alternative développée dans ce circuit ne peut l'entretenir.

» Il s'amortit et, après s'être annulé, se rétablit à travers les robinets 3 et 4 en parcourant le circuit R en sens inverse de la flèche.

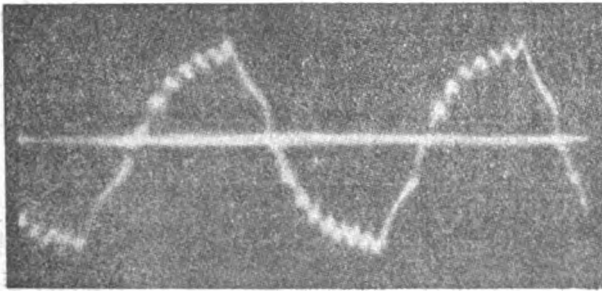


Fig. 16.

» L'oscillogramme de la figure 16 relevé pendant la transformation d'un courant de fréquence 500 p:s en courant de fréquence 50 p:s, avec un circuit R constitué par une résistance inductive, montre qu'il en est bien ainsi.

» Or, si le courant continue à passer dans le robinet 2, tandis

que les grilles des robinets 3 et 4 sont devenues positives, un courant de court-circuit se ferme à travers les robinets 2 et 4 et les circuits S_1 et S_2 , chaque fois que les forces électromotrices développées dans ceux-ci tendent à faire entrer le courant par l'anode du robinet 2 et le faire sortir par la cathode du robinet 4, soit pendant la moitié du temps. Pour l'éviter, il faut faire embrasser un arc plus grand à la coquille du commutateur C relié au pôle négatif de la batterie Ac qu'à celle reliée à son pôle positif, afin que le courant traversant le robinet 2 puisse s'amortir entre le moment où la grille de ce robinet cesse d'être positive et celui où les grilles des robinets 3 et 4 commencent à l'être ; moyennant cette précaution, on obtiendra un très bon rendement.

» D'autres expériences ont montré que l'on pouvait de même, en rendant successivement positive et négative la grille d'un robinet, couper ou rétablir des courants alternatifs de fréquence 30 000 p.s.

» Enfin, en disposant de plusieurs appareils semblables alimentés par d'autres circuits secondaires S'_1 , S'_2 , S''_1 , S''_2 , excités par le même circuit primaire P et dont les commutateurs, montés sur un même axe, soient successivement décalés les uns par rapport aux autres, on produirait des courants déphasés.

» Les robinets que nous avons expérimentés avaient des enveloppes en verre, mais on pourrait, dès à présent, leur donner des enveloppes métalliques, en suivant la même technique que MM. Brown-Boveri dans la construction de leurs redresseurs à vapeur de mercure.

» III. TRANSFORMATION D'UN COURANT CONTINU EN COURANT DE FRÉQUENCE USUELLE ET VARIABLE A VOLONTÉ. — Il suffit, pour cela, d'associer les appareils représentés sur les figures 11 et 13. Le premier transformera le courant continu en courant alternatif de fréquence très élevée que le second retransformera en un courant dont la fréquence f' sera égale à la vitesse de rotation de son commutateur, dont on disposera à son gré.

» Les quantités d'énergie que devront emmagasiner les bobines de self-induction et le condensateur du premier appareil seront inversement proportionnelles à la fréquence. Le transformateur A du second appareil sera parcouru par des courants de haute fréquence. Donc, à condition de rendre cette fréquence

très élevée, l'importance de tout ce matériel sera très petite par rapport à sa puissance.

» IV.-APPLICATION A LA TRACTION DES VÉHICULES SUR VOIE FERRÉE, SANS TROLLEY, PAR COURANTS ALTERNATIFS DE HAUTE FRÉQUENCE. — Il est difficile de faire arriver, sur un véhicule animé d'une grande vitesse, des courants très intenses au moyen d'un contact glissant. En élevant leur tension, on diminuait leur intensité et cela facilitait beaucoup leur captage, tout en économisant du cuivre. C'est pourquoi on voulait se servir de courants alternatifs, de fréquence usuelle, en les transformant sur la locomotive, avant leur envoi dans les moteurs. Mais on a dû y renoncer, parce qu'ils troublaient les communications télégraphiques et téléphoniques dans le voisinage de leur ligne de transmission.

» Or, si l'on se servait de courants alternatifs de fréquence élevée, 20 000 p:s par exemple, en les faisant circuler dans des conducteurs tendus au-dessus des voies, ils pourraient en induire d'autres dans un circuit porté par les voitures d'un train et s'étendant au-dessus d'elles, parallèlement à ces conducteurs. Il n'y aurait plus de contact glissant. D'autre part, les courants induits dans les lignes télégraphiques et téléphoniques seraient sans action sur leurs récepteurs, à cause de leur fréquence, et, pour les empêcher de produire des surtensions dans les lignes télégraphiques à simple fil, il suffirait de relier celles-ci à la terre, de distance en distance, par des condensateurs qui laisseraient passer, en ne leur opposant qu'une très faible impédance, les courants de fréquence 20 000 p:s, mais arrêteraient les courants télégraphiques.

» 1° *Ligne de transmission.* — Pour fixer les idées, supposons cette ligne constituée par deux conducteurs parallèles et horizontaux, distants l'un de l'autre de 1,25 m, situés à 4 m au-dessus des rails et symétriquement disposés par rapport à un plan vertical passant par le milieu de la voie.

» Chaque conducteur se compose de deux tubes concentriques de 1 mm d'épaisseur. Le diamètre extérieur du tube intérieur est de 20 mm; celui du tube extérieure, de 26 mm. Ils sont séparés par un diélectrique épais de 2 mm, dont nous supposons le pouvoir inducteur spécifique égal à 2 et la rigidité électrostatique égale à 4 000 000 v:cm.

» Ces tubes sont interrompus de distance en distance (fig. 17) et chacun d'eux est divisé en tronçons de même longueur isolés

les uns des autres, mais les points d'interruption d'un tube sont à égale distance de ceux de l'autre. La ligne se compose ainsi de condensateurs identiques associés en série.

» Son coefficient de self-induction est de $3,751.10^{-3}$ henry par kilomètre. La capacité d'un condensateur élémentaire long de 1 km. serait de $0,6094.10^{-6}$ farad. Pour que la ligne résonne, lorsqu'elle est parcourue par des courants de fréquence 20 000 p/s,



Fig. 17.

chacun des tronçons doit avoir une longueur de 471,3 mètres. Nous y ferons passer 100 ampères au plus ; la tension supportée par le diélectrique sera alors de 5 542 volts, et il en faudrait 80 000 pour le percer. Enfin, la capacité en dérivation de la ligne, compte tenu de la présence du sol, est de $0,0125.10^{-6}$ farad par kilomètre. Pour compenser ces effets, on branche, tous les kilomètres, entre les deux conducteurs d'aller et de retour, une bobine ayant un coefficient de self-induction de 0,00507 henry.

» 2° *Alimentation de la ligne de transmission.* — Une ligne primaire parcourue par un courant continu à haute tension dessert des postes de transformation (fig. 18) semblables à celui de la figure 11, mais le transformateur desservant le réseau d'alimen-

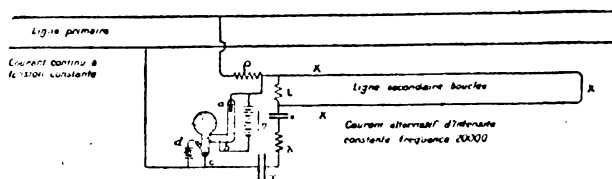


Fig. 18. — Poste de transformation.

tation est remplacé par un second résonateur LC accordé, comme le résonateur, pour la fréquence 10 000 p/s. La ligne secondaire XX, où l'on veut envoyer le courant alternatif, est en forme de boucle et branchée entre les bornes de la bobine L. Alors, comme l'a démontré jadis M. Boucherot, si une différence de potentiel efficace constante est maintenue entre les bornes du résonateur LC, la ligne XX est parcourue par un courant d'intensité efficace constante, quelle que soit son impédance. Enfin, si sa self-induc-

tion est compensée par des capacités, comme dans le cas actuel, le courant qui traverse le résonateur LC est complètement en phase.

» 3° *Circuits induits des voitures.* — Sur les toits des voitures (fig. 19 et 20) sont disposés, à 1,25 m l'un de l'autre, deux tubes m et n de 10 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur. Chacun s'étend à 400 mm au-dessous d'un des conducteurs de la ligne de transmission.

» Ces tubes sont portés par des isolateurs et reliés à ceux des voitures suivantes par des conducteurs souples munis de raccords mâle et femelle. A l'extrémité du train, les deux brins plon-

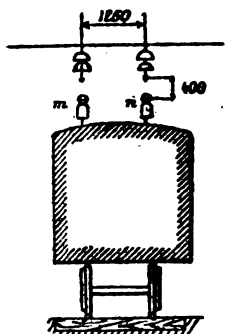


Fig. 19.

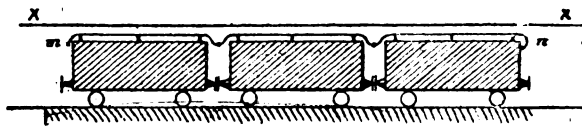


Fig. 20.

geant des tubes sont accouplés entre eux et forment le circuit. En tête du train, il est fermé par les appareils de transformation.

» Par mètre de longueur, ce circuit a, avec la ligne, un coefficient d'induction mutuelle de $458,7 \cdot 10^{-9}$ henry; son coefficient de self-induction est de $207,5 \cdot 10^{-9}$ henry. En y faisant passer un courant de 1 735 ampères, on détermine, dans la ligne, une chute de tension de 100 volts par mètre de longueur, en lui prenant 10 kilowatts.

» Mais il faut, pour cela, que le circuit induit résonne. Dans ce but, chaque voiture porte un condensateur intercalé dans ce circuit. Supposons que sa longueur entre tampons soit 13 m; ce condensateur doit avoir une capacité de 1,892 microfarad, il supportera une tension de 7 300 volts efficaces et emmagasinerà alors une énergie de 101 joules; la puissance rendue disponible sur la voiture est de 130 kilowatts.

» 4° *Maintien de la résonance.* — Pour que le circuit induit résonne, il faut qu'il soit parfaitement accordé et l'accord doit être

maintenu automatiquement. Dans ce but (fig. 21), la voiture automotrice est munie d'une self-induction variable D intercalée dans le circuit induit du train et composée de deux bobines l_1 et l_2 , la première fixe, la seconde mobile : elle passe d'un minimum à un maximum lorsque la bobine l_2 tourne de 180° . Un moteur G meut celle-ci dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il convient de diminuer ou d'augmenter la self-induction du circuit induit.

» Les mouvements du moteur G sont commandés par un appareil comprenant une self-induction variable E composée d'une pe-

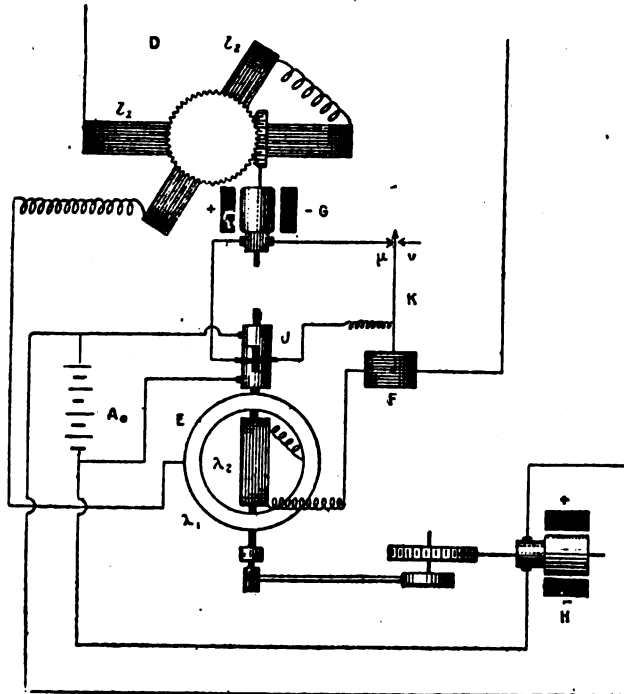


Fig. 21.

tite bobine fixe λ_1 et d'une petite bobine λ_2 , qu'un moteur H fait constamment osciller autour d'un plan perpendiculaire à la bobine λ_1 . Les bobines λ_1 et λ_2 sont montées en série dans le circuit induit, comme les bobines l_1 et l_2 avec un galvanomètre F , dont l'aiguille repose à frottement doux sur son axe.

» En oscillant, la bobine λ_2 augmente ou diminue d'une petite quantité la self-induction du circuit induit et, par suite, y fait varier l'intensité i du courant, de 1 pour 100 par exemple. L'aiguille du galvanomètre peut se déplacer d'une très petite quantité entre deux pointes μ et μ' . Si elle s'appuie sur la pointe μ , elle ferme,

par l'intermédiaire d'un relais non représenté sur la figure, le circuit du moteur G. Elle l'ouvre, au contraire, si elle s'appuie sur la pointe μ' . Elle s'appuie sur la pointe μ si l'intensité i augmente, et sur la pointe μ' , si cette intensité diminue.

» Un inverseur monté sur l'axe de la bobine λ_2 envoie dans l'induit du moteur, dont les inducteurs sont toujours excités de la même manière, un courant d'un sens ou de l'autre, suivant que la bobine λ_1 s'est inclinée à gauche ou à droite. Les connexions sont établies de manière que le moteur fasse croître la self-induction D, si la self-induction E a augmenté et réciproquement, mais il ne se met en marche que si le déplacement de la bobine λ_2 a déterminé un accroissement de l'intensité i et s'arrête dès que celle-ci cesse de croître. Dans ces conditions, la self-induction D varie automatiquement, de manière à rendre maximum l'intensité i du courant dans le circuit induit.

» 5° *Commande des moteurs du train.* — Si le train a Λ mètres de longueur, on dispose, dans la voiture de tête, d'une puissance de 10 Λ kilowatts apportée par des courants alternatifs de fréquence 20 000 p.s, fournis sous la tension de 5,75 Λ volts. Mais on peut modérer à volonté cette puissance en désaccordant le circuit induit des voitures et, par suite, limiter à volonté l'intensité du courant fourni. Il suffit, pour cela, d'ajouter au système une bobine de self-induction que manœvrera le wattmann.

» Ces courants seront transformés en courants triphasés, d'une fréquence aussi basse que l'on voudra et que l'on fera varier avec la vitesse du train. Cela permettra d'employer des moteurs à cage d'écureuil, les plus simples de tous, qu'il n'y aura aucun inconvénient à répartir sous les voitures, en les rendant toutes automotrices. Ils seront associés en série, la force électromotrice dont on disposera étant proportionnelle au nombre des voitures et, par suite, à celui des moteurs.

» Non seulement ce système dispense de l'emploi des contacts glissants, mais il permet d'envoyer dans la ligne de transmission, des courants de très haute tension, et de recueillir des courants de tension modérée sur le train, soit de 75 volts environ par voiture. La ligne constitue, en effet, le circuit primaire d'un transformateur, dont le circuit secondaire est le circuit induit porté par les voitures. Tous les appareils de transformation sont statiques, à l'exception d'un commutateur, qui ne coupe que des microampères.

res, et les appareils de contrôle se réduisent à une bobine de self-induction variable et au très petit rhéostat destiné à régler la vitesse du commutateur. Enfin, il permet de n'employer que des moteurs d'induction à cage d'écureuil.

» Ce système paraît donc devoir être beaucoup plus simple et plus économique que les systèmes actuels à tous les points de vue.

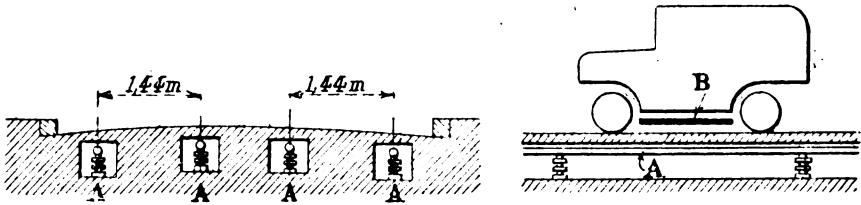


Fig. 22. — Le long de chaque piste montante ou descendante sont disposés deux canivaux A, A, en grès, maçonnerie ou béton. Ils affleurent le sol et marquent la piste que doivent suivre les chauffeurs. On sait que rien n'est plus facile.

Leur écartement est égal à l'écartement normal des roues des voitures, soit 1,44 m.

A l'intérieur de ces canivaux sont disposés des conducteurs condensateurs semblables à ceux décrits dans le texte. Ils sont isolés, mais n'ont pas d'enveloppe métallique. On peut aussi les faire simplement reposer sur des isoloirs en porcelaine.

Le circuit induit B de la voiture est de forme rectangulaire. Il est suspendu au-dessous d'elle et ses branches longitudinales se projettent sur les câbles.

A part cette disposition des câbles au-dessous de la route, l'installation est semblable à celle des voies ferrées.

Observations. — C'est un courant d'intensité efficace constante i qui passe dans des câbles A, A. La somme des intensités des courants qui peuvent être induits dans les conducteurs voisins, tant que ceux-ci n'ont pas leur self-induction annulée par des condensateurs, comme les circuits induits des voitures, a pour limite très supérieure i et cette intensité sera peu élevée.

On n'a donc pas à redouter de perte d'énergie considérable dans ces conducteurs.

V. APPLICATION A LA TRACTION DES AUTOMOBILES

» Des automobiles pourraient être actionnées de la même manière sur une route, le long de laquelle les voitures montantes suivraient une piste dite montante et les voitures descendantes une piste dite descendante.

» N'étant liée par aucun lien matériel à aucun conducteur fixe, une voiture montante pourrait emprunter momentanément la voie descendante, si elle était libre, pour dépasser une autre voiture montante, comme cela se pratique couramment.

» Seules les routes principales seraient électrifiées. Mais chaque voiture serait munie d'une batterie d'accumulateurs : en l'utilisant, elle pourrait gagner la route électrifiée ou la quitter, pour se rendre à sa destination.

» Elle ferait ainsi, à grande vitesse, sur la route électrifiée, la majeure partie de son parcours et, pendant ce temps, rechargerait sa batterie.

» On résoudrait ainsi la crise mondiale du pétrole.

» Les schémas de la figure 22 montrent comment devrait être aménagée la route.

» On aura, certes, bien des difficultés à surmonter avant de réaliser les robinets, même à vapeur de mercure, de grande puissance nécessaires pour produire ou transformer les courants alternatifs de fréquence élevée. Mais, nous avons cru devoir signaler, dès à présent, ces diverses applications pour montrer l'intérêt que présente l'étude de ces appareils, et nous serions heureux si nous pouvions la mettre à l'ordre du jour.

M. le PRÉSIDENT remercie M. Maurice Leblanc de sa communication.

SUR L'AMORTISSEMENT DES ALTERNATEURS

La théorie de l'amortissement des alternateurs couplés, telle qu'elle est présentée depuis vingt ans, dans les traités d'Electrotechnique, ne constitue qu'une approximation assez éloignée de la réalité. Le but du présent mémoire est de préciser notablement cette théorie, tout en lui conservant son caractère élémentaire; il constitue ainsi une sorte d'introduction aux travaux très complets, publiés tout récemment sur la même question, par MM. A. Blondel et P. Boucherot, travaux d'un grand intérêt, mais d'une lecture certainement ardue.

M. J. BETHENOD. — « Le problème de l'amortissement artificiel par courants induits présente, comme on le sait, une grande importance, en ce qui concerne notamment l'application aux alternateurs. L'amortisseur de M. Leblanc, connu depuis plus de trente années ⁽¹⁾, a été l'objet de nombreuses adaptations à des cas variés, et, pour ne citer que des travaux d'avant-guerre relativement récents et ayant une origine française, la théorie des phénomènes mis en jeu a été abordée de façon précise par MM. C.-F. Guilbert ⁽²⁾, puis P. Boucherot ⁽³⁾, dont le très important travail a élucidé nombre de questions. Cependant, il m'a paru que cette théorie comportait encore quelques points, sinon obscurs, du moins étayés sur des calculs assez difficiles à suivre, et j'ai ainsi pensé qu'il ne serait pas inutile de reprendre l'étude élémentaire de la question, en commençant par examiner quelques cas simples d'amortissement, faciles à discuter de façon très complète. J'ajouterai, d'ailleurs, que le présent travail était complètement rédigé, quand j'ai reçu de M. A. Blondel communication d'une note présentée par lui à l'Académie des Sciences, le 24 février 1919, époque à laquelle j'avais dû cesser tout travail. Dans cette note, qui m'avait ainsi échappé, se trouve condensée une théorie extrêmement complète de l'amortissement dans les alternateurs couplés.

» Cette théorie conduit aux mêmes résultats que les calculs exposés ci-après, mais j'ai pensé faire encore œuvre utile en maintenant le sujet de ma communication. Mon exposé ne comporte, en effet, que des calculs d'ordre élémentaire, tandis

⁽¹⁾ *La Lumière électrique* (1^{re} Série), 24 décembre 1892, tome XLVI, p. 601.

⁽²⁾ C.-F. GUILBERT. Sur la valeur de l'amortissement dans le couplage en parallèle des alternateurs ; *La Lumière électrique* (2^e Série), 19 mars 1910, t. IX, p. 355, et 26 mars 1910, t. IX, p. 387. Cet article contient une analyse détaillée d'un travail de M. F. Emde.

⁽³⁾ P. BOUCHEROT. Amortissement et amortisseurs des alternateurs. *La Lumière électrique* (2^e Série), 8 novembre 1913, t. XXIV, p. 166, et numéros suivants.

que l'admirable mémoire de M. Blondel fait usage d'une méthode symbolique beaucoup plus ardue. Je me permettrai d'ajouter que mon travail contient encore certains résultats inédits, destinés plus spécialement aux praticiens.

» 1° ETUDE DE L'AMORTISSEMENT DANS LE CAS D'UN INDUIT A SPIRES EN COURT-CIRCUIT OSCILLANT DANS UN CHAMP INDUCTEUR D'INTENSITÉ DÉTERMINÉE. — Considérons (fig. 1) le système formé par un induit oscillant autour de son axe dans le champ inducteur créé par les pôles P P' ; supposons d'abord que cet induit comporte une seule spire dont le plan fait, au repos, l'angle θ avec la perpendiculaire Y Y' à l'axe des pôles X X'.

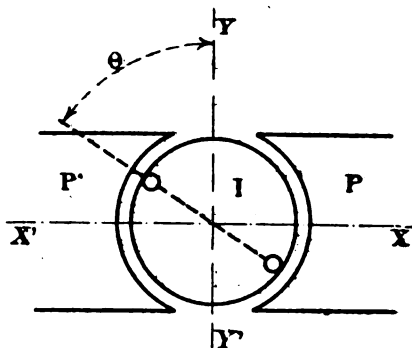


Fig. 1.

» Supposons maintenant que l'induit subisse un déplacement angulaire périodique, très petit, donné en fonction du temps par l'expression — $\Delta\theta \cos \alpha t$ (c'est-à-dire dont les amplitudes sont égales à $\Delta\theta$ en valeur absolue). Soit H le champ dans l'entrefer au point où la spire occupe la position angulaire θ ; le déplacement périodique ayant une très petite amplitude, la force électromotrice dans la spire vaut :

$$(1) \quad e = 2 H L v,$$

ou

$$e = 2 H L \frac{D}{2} \alpha \Delta\theta \sin \alpha t,$$

en désignant par v la vitesse tangentielle instantanée, par L la longueur de l'induit suivant l'axe, et par D son diamètre.

» Le courant correspondant est donc :

$$(2) \quad i = \frac{H L D \alpha \Delta\theta \sin (\alpha t - \gamma)}{\sqrt{r^2 + l^2 \alpha^2}},$$

en appelant r et l la résistance et la self-inductance de la spire, et en posant $\operatorname{tg} \gamma = \frac{l\alpha}{r}$.

» L'effort instantané, exercé sur la spire, est ainsi :

$$F = 2 H L i,$$

ce qui correspond à un couple

$$(3) \quad F \times \frac{D}{2} = \frac{H^2 L^2 D^2 \alpha \Delta \theta \sin(\alpha t - \gamma)}{\sqrt{r^2 + l^2 \alpha^2}}.$$

» Considérons maintenant l'équation du mouvement de l'induit sous l'action d'un couple mécanique harmonique de fréquence $\frac{\alpha}{2\pi}$, c'est-à-dire de la forme $I \sin(\alpha t + \psi)$; on peut écrire :

$$(4) \quad I \sin(\alpha t + \psi) = \frac{2J}{D} \cdot \frac{dv}{dt} + S + \frac{FD}{2},$$

en désignant par J le moment d'inertie évalué au mode ordinaire et en supposant qu'un effort supplémentaire, de forme $S = -C_s \Delta \theta \cos \alpha t$, c'est-à-dire de nature *élastique*, est exercé sur l'induit l .

» Tenant compte dans (4) des valeurs de v , F , S , en fonction de αt , et en mettant en évidence les termes en $\sin \alpha t$ et les termes en $\cos \alpha t$, on obtient :

$$(5) \quad I \sin(\alpha t + \psi) = \left(J \alpha^2 - C_s - \frac{H^2 L^2 D^2 l \alpha^2}{r^2 + l^2 \alpha^2} \right) \Delta \theta \cos \alpha t \\ + \frac{H^2 L^2 D^2 r \alpha}{r^2 + l^2 \alpha^2} \Delta \theta \sin \alpha t,$$

égalité qui permet de calculer très aisément l'amplitude $\Delta \theta$ de l'écart angulaire.

» En examinant cette égalité, on reconnaît de suite que tout se passe, avec l'amortisseur élémentaire constitué par la spire, comme si l'effort élastique subissait un accroissement relatif

égal à $\frac{H^2 L^2 D^2 l \alpha^2}{C_s (r^2 + l^2 \alpha^2)}$.

» Ce premier résultat est conforme à celui indiqué initialement par MM. P. Boucherot et A. Blondel (loc. cit), l'effet croissant, d'ailleurs, de plus en plus lentement avec α .

» Quant à l'amortissement, il est évidemment mesuré par le terme $\frac{H^2 D^2 L^2 r \alpha}{r^2 + l^2 \alpha^2}$; en fonction de r , il est donc maximum pour $r = l \alpha$, résultat également indiqué par M. P. Boucherot. En fonction de α , il a d'ailleurs un maximum correspondant à la même condition.

» Quoiqu'il en soit, les résultats qui précèdent demeurent variables lorsque l'inducteur P P' subit un mouvement de rotation uniforme, de vitesse angulaire ω , autour de l'axe O, à condition que l'induit I ait lui-même une vitesse angulaire de la forme $\omega(1 + \varepsilon \sin \alpha t)$; cette remarque laisse entrevoir comment ces résultats peuvent être étendus à l'étude des amortisseurs appliqués à une machine synchrone à champ tournant.

» 2° CAS D'UN ALTERNATEUR RELIÉ A UN RÉSEAU. — Ce cas est beaucoup plus compliqué que le cas simple qui vient d'être traité, tout au moins si on désire atteindre une grande exactitude théorique (d'ailleurs souvent rendue illusoire en pratique). En effet, lorsque des oscillations lentes du rotor prennent naissance, elles entraînent une déformation périodique du champ résultant des ampérétours d'excitation et de réaction, et cette déformation est d'autant plus difficile à calculer qu'il y a lieu de tenir compte de l'effet de la saturation et, éventuellement, de celui des pôles saillants.

» Cependant, si on suppose faible l'impédance représentant l'effet combiné de la chute ohmique et de la chute de tension réactive correspondant aux fuites magnétiques de l'induit, on peut admettre, en première approximation, que ce champ résultant est constant, et tourne avec une vitesse uniforme, déterminée par la fréquence du réseau.

» Les formules ci-dessus sont alors immédiatement applicables ; on distinguera deux cas :

» a) *Alternateur muni d'un amortisseur à cage d'écureuil.* — Supposons, en outre, que le champ H a une distribution sinusoïdale ; la cage d'écureuil peut être complétée en disposant une seconde spire à angle droit de la première, et si on désigne par H' le champ dans l'entrefer suivant le plan passant par la première spire, par H'' le champ correspondant pour la seconde, on peut écrire :

$$(6) \quad H'^2 + H''^2 = H_m^2$$

H_m étant l'amplitude du champ.

» D'après (5), on en conclut que l'amortissement est indépendant de la position des spires par rapport au champ inducteur dû aux pôles P P' et que le couple amortisseur, défini comme d'habitude, vaut :

$$(7) \quad C_a = \frac{H_m^2 L^2 D^2 r \omega}{r^2 + l^2 x^2}.$$

» L'expression de C_1 montre que ce couple est encore maximum en fonction de r pour $l\alpha = r$, conformément aux résultats obtenus par M. P. Boucherot, et l'augmentation de l'effort élastique devient dans le cas présent $\frac{H_m^2 L^2 D^2 l \alpha^2}{r^2 + l^2 \alpha^2}$, en tenant compte de l'effet résultant des deux circuits amortisseurs.

» Le cas d'une distribution non sinusoïdale du champ est beaucoup plus compliqué, mais les formules qui précèdent permettent encore de résoudre le problème, en considérant séparément les actions de deux circuits amortisseurs ; si on connaît, en effet, la relation $H = f(\theta)$ et si l'angle θ est déterminé en fonction de la grandeur et de la nature de la charge, les formules en question fournissent immédiatement la solution. Dans tous les cas, il est à noter expressément, conformément encore à une remarque essentielle de M. P. Boucherot, que, dans la formule(7), le coefficient de self-induction l correspond au flux de fuites entre le circuit magnétique commun et les spires de l'amortisseur, absolument comme dans le cas d'un moteur asynchrone. Du reste, ce flux est ici comparativement élevé, eu égard à l'entrefer plus grand, à la position moins favorable des barres de l'amortisseur par rapport à l'entrefer, etc...

» On ne peut donc, en tout cas, négliger $l\alpha$ vis-à-vis de r , comme l'a fait notamment M. E. Emde dans l'étude précitée, et il convient d'évaluer l avec une certaine précision, parfois difficile à atteindre.

b) *Alternateur muni d'un amortisseur à grille.* — Conformément à un usage général, nous désignons par amortisseur à grille, un amortisseur moins parfait que le précédent, constitué par des spires disposées dans les épanouissements polaires, concentriquement aux spires de l'enroulement inducteur.

» D'ailleurs, ces dernières spires jouent elles-mêmes, en principe, le rôle d'amortisseurs à grilles, mais leur effet est toujours assez réduit à ce point de vue, eu égard à la grande self-inductance du circuit inducteur complet et aux fuites considérables qu'il présente vis-à-vis des spires de l'induit.

» De toutes façons, pour une distribution sinusoïdale des flux, en posant $H = H_m \sin \theta$, le cas présent s'exprime par :

$$(8) \quad C_1 = \frac{H_m^2 \sin^2 \theta L^2 D^2 r \omega}{r^2 + l^2 \alpha^2},$$

et si on connaît encore la variation de θ en fonction de la nature

et de la grandeur de la charge, on peut évaluer C_s très aisément.

» Reportons-nous au triangle fondamental des ampères-tours de l'alternateur considéré (fig. 2) ; les ampères-tours d'excitation A_0 forment la résultante des ampères-tours résultants A et des ampères-tours de réaction $a I \sqrt{2}$, proportionnels au débit I de l'induit. (On néglige ici l'effet de réaction des amortisseurs, d'ailleurs très faible pratiquement.)

» L'angle θ de la formule (8) est l'angle entre AB et AC (angle entre l'axe des spires de l'inducteur et le flux résultant); d'autre part, avec l'approximation poursuivie ici, toujours assez faible d'après ce qui a été dit plus haut, l'angle entre A et $a I \sqrt{2}$

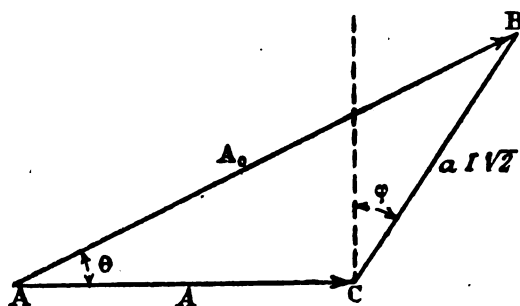


Fig. 2.

est égal au complément de l'angle de déphasage φ entre la tension aux bornes du réseau et le courant de débit I . On a donc la relation:

$$A_0 \sin \theta = a I \sqrt{2} \cos \varphi,$$

d'où pour C_s la forme très intéressante:

$$(9) \quad C_s = a^2 L^2 D^2 \times \frac{r \omega}{r^2 + l^2 \alpha^2} \times \frac{H_m^2}{A^2} \times 2 I^2 \cos^2 \varphi.$$

» Ainsi donc, dans le cas d'un amortisseur à grille, le couple d'amortissement ne dépend que du courant en phase, et il est sensiblement proportionnel au carré de ce courant. Il est nul à vide, ou en cas de débit réactif.

» Ce résultat est indiqué également par M. P. Boucherot (loc. cit.) ; mais la formule à laquelle il est conduit est d'allure plus complexe que la formule (9), bien que les approximations consenties semblent sensiblement plus faibles. La comparaison

des formules (8) et (9) permet aisément de se rendre compte de la différence d'action des deux types d'amortisseurs ; en particulier, dans le cas d'amortisseurs à grilles, le facteur $\left(\frac{H_m}{A_0}\right)^2$ précise l'influence de la saturation du circuit magnétique commun. On peut écrire, en effet :

$$\frac{H_m}{A_0} = \frac{H_m}{A} \times \frac{A}{A_0},$$

et le premier facteur du second membre est mesuré par la tangente à la caractéristique du circuit magnétique principal. Le second facteur sert d'ailleurs également à définir l'état magnétique caractéristique de la machine, ce facteur étant évidemment d'autant plus faible que la réaction d'induit est plus accusée ; avec une machine à forte réaction (genre turbo-alternateur), le couple amortisseur est donc moins élevé, toutes choses égales d'ailleurs.

» *Cas des machines multipolaires.* — Dans les formules précédentes, on a supposé que le rotor bipolaire tournait à la vitesse angulaire $\omega (1 + \varepsilon \sin \alpha t)$, ω étant la pulsation du réseau ; dans le d'une machine à $2p$ pôles, le calcul des couples n'est guère plus compliqué. Si on envisage, par exemple, le couple d'amortissement C_a , on peut écrire avec l'hypothèse d'une cage d'écuireuil complète :

$$(7') \quad C_a = \frac{p H_m^2 L^2 D^2 r \Omega}{r^2 + l^2 \alpha^2},$$

car il y a p fois plus de spires sur la périphérie, et la vitesse angulaire moyenne est maintenant $\Omega = \frac{\omega}{p}$.

En conservant donc le symbole ω pour la pulsation, la formule (7) est d'une application générale. Toutefois, il est souvent plus commode, en pratique, d'évaluer C_a en fonction du flux maximum total Φ , égal à p fois le flux maximum issu d'un pôle ; on a d'ailleurs

$$(10) \quad \Phi = D L H_m.$$

puisque la distribution est supposée sinusoïdale.

» La formule (7') prend ainsi la forme générale.

$$(11) \quad C_a = \frac{p \Phi^2 r \Omega}{r^2 + l^2 \alpha^2},$$

et la formule (9) s'écrit de même:

$$(12) \quad C_a = 2 \times \frac{p r \Omega}{r^2 + l^2 \alpha^2} \times \left(\frac{a \Phi}{A} \right)^2 \times \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \times I^2 \cos^2 \varphi,$$

les flux et les ampères-tours étant exprimés en valeur maximum et le courant, en valeur efficace.

» En résumé, dans les deux cas-types qui viennent d'être examinés (amortisseurs à cage d'écureuil et amortisseurs à grille), on peut, en première approximation, évaluer l'écart angulaire $\Delta \theta$ en fonction du couple périodique $\Gamma \sin(\alpha t + \psi)$ et des diverses constantes, au moyen d'une égalité de la forme.

$\Gamma \sin(\alpha t + \psi) = \left(J \alpha^2 - C_s - \frac{\alpha}{\Omega} C_a \operatorname{tg} \gamma \right) \Delta \theta \cos \alpha t + \frac{\alpha}{\Omega} C_a \Delta \theta \sin \alpha t$
en adoptant, suivant le cas, la formule (11) ou la formule (12).

» *Expression de l'amplitude $\Delta \theta$ de l'écart angulaire.* — D'après ce qui précède, on peut donc écrire d'une façon générale, en passant aux amplitudes:

$$(13) \quad \Delta \theta = \frac{\Gamma}{\sqrt{C_a^2 \times \frac{\alpha^2}{\Omega^2} + \left[J \alpha^2 - C_s - \frac{\alpha}{\Omega} C_a \operatorname{tg} \gamma \right]^2}},$$

et, d'autre part, on a:

$$(14) \quad \varepsilon = \frac{\alpha \Delta \theta}{\Omega}$$

» Les formules (13) et (14), associées aux expressions (11) et (12), permettent d'analyser d'assez près l'influence des circuits amortisseurs dans les deux cas-types envisagés ci-dessus. A cet effet, on peut poser utilement

$$C_a \times \frac{\alpha}{\Omega} = D \sin \gamma \cos \gamma,$$

avec:

$$(15) \quad D = \frac{p \Phi^2}{l}, \text{ ou } D = \frac{2 p}{l} \times \left(\frac{a \Phi}{A} \right)^2 \times \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \times I^2 \cos^2 \varphi,$$

suivant les cas.

» La formule (13) s'écrit alors

$$(16) \quad \Delta \theta = \frac{\Gamma}{\sqrt{D^2 \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma + (C_r - D \sin^2 \gamma)^2}},$$

en posant, pour simplifier l'écriture:

$$(17) \quad C_r = J \alpha^2 - C_s,$$

» En fonction de γ , le dénominateur du second membre de

(16), que nous désignerons par C , est susceptible d'une interprétation graphique quasi-évidente.

» a) En effet, supposons d'abord $C_r > D > 0$.

» Après avoir tracé sur $AB = D$ comme diamètre (fig. 3) un

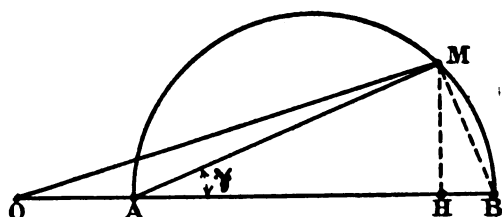


Fig. 3.

demi-cercle AMB , portons la longueur C_r en OB , puis figurons en

MAB l'angle tel que $\lg \gamma = \frac{l \alpha}{r}$.

» D'après (16), on reconnaît de suite en $\overline{OM}$ un vecteur dont la longueur mesure précisément la quantité C en question, c'est-à-dire l'inverse de l'amplitude angulaire $\Delta \theta$.

» Par le diagramme ainsi tracé, on constate donc que, pour toute valeur de D inférieure à C_r , le maximum de C (c'est-à-dire le minimum de $\Delta \theta$) a lieu toujours pour $\gamma = 0$, c'est-à-dire sans amortisseurs. Ceux-ci augmentent donc l'écart angulaire, lorsque l'inégalité

$$J\alpha^2 - C_s > D$$

est satisfaite (C_s et D sont essentiellement positifs).

» Nous allons voir, d'ailleurs, que cette condition suffisante

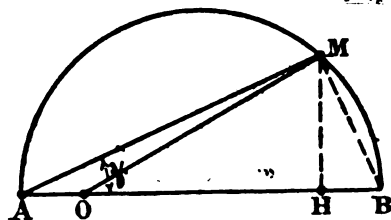


Fig. 4.

n'est pas nécessaire, et que D peut atteindre une valeur double sans que la conclusion soit modifiée.

» b) Supposons maintenant, en effet, $D > C_r > 0$.

» Le diagramme figuratif de C prend évidemment l'aspect de la figure 4, les lettres conservant leurs significations respectives.

L'examen de ce diagramme montre de suite qu'il y a lieu de subdiviser en trois le cas présent :

» b_1) $2 C_r > D > C_r$. Le point O se trouve alors, par rapport au centre du cercle, du côté opposé au point B ; ainsi donc, pour toute valeur de D comprise entre C_r et $2 C_r$ le minimum de l'écart angulaire a encore lieu pour $\gamma = 0$, c'est-à-dire *sans amortisseurs*.

» En conséquence, on peut dire que ceux-ci augmentent l'écart angulaire tant que l'inégalité

$$D < 2 (J \alpha^2 - C_s)$$

est satisfaite.

» b_2) $D = 2 C_r$. Le point O se trouve confondu avec le centre du cercle AMB (fig. 4), et, en conséquence, l'écart angulaire réalisé avec amortisseurs demeure égal, quel que soit γ , c'est-à-

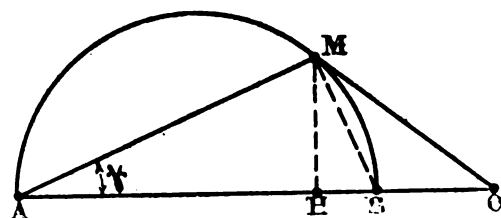


Fig. 5.

dire quelle que soit leur résistance ohmique, à l'écart angulaire atteint sans amortisseurs.

» b_3) $D > 2 C_r$. Le point O se trouve par rapport au centre du cercle AMB, du même côté que le point B, l'écart angulaire est alors évidemment minimum lorsque l'angle γ vaut $\frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire lorsque les amortisseurs présentent une résistance ohmique aussi faible que possible.

» L'écart angulaire minimum limite vaut alors, pour une valeur donnée de D :

$$(18) \quad \frac{\Gamma}{D - C_r}$$

il est donc, en général, notablement plus petit que sans amortisseurs.

» c) Supposons enfin $C_r < 0$. Ce cas, qui correspond à un volant plus faible que le volant de résonance, est d'ordinaire assez rare en pratique ; de toute façon, le diagramme représentatif de C se présente alors comme l'indique la figure (5), et montre im-

immédiatement que l'écart angulaire est encore minimum lorsque les amortisseurs offrent une résistance ohmique négligeable.

» La valeur limite inférieure de cet écart est évidemment:

$$(19) \quad \frac{\Gamma}{D + C_r},$$

donc plus faible que pour le cas b_3 , toutes choses égales d'ailleurs.

» En résumé, de la discussion précédente, on peut conclure qu'il est nécessaire, pour obtenir une réduction de l'écart angulaire par l'emploi d'amortisseurs, de réaliser la condition unique

$$(20) \quad D > 2 (J\alpha^2 - C_s),$$

évidemment facilitée lorsque l'inductance de fuites est faible.

» L'effet de réduction est alors d'autant plus accusé que la résistance ohmique des amortisseurs est plus réduite.

» En terminant, j'ajouterai que les formules extrêmement complètes de M. Blondel l'ont conduit à un diagramme analogue à ceux que je viens d'indiquer. En outre, dans des mémoires ultérieurs, dont certains n'ont pas encore été publiés, M. Blondel a traité le cas des oscillations libres, cas dont l'étude théorique est encore plus complexe. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. J. Bethenod de sa communication.

BIBLIOGRAPHIE

La Radiotéléphonie, par Carlo Toché, Ancien élève de l'Ecole Polytechnique, ancien officier radiotélégraphiste au Grand Quartier Général. Préface du Général Ferrié, Membre de l'Institut. Un volume 24 cm × 19 cm de 98 pages, 44 figures dont 9 photographies. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

L'ouvrage du capitaine Toché a pour but de répondre aussi clairement que possible à la curiosité que le public manifeste aujourd'hui pour tout ce qui touche la radiotéléphonie ; il est écrit non seulement pour les électriciens et les ingénieurs, mais encore et surtout pour le grand nombre de gens intelligents qui voudraient, en s'appuyant seulement sur les connaissances scientifiques générales qu'ils possèdent, acquérir des notions nettes sur le principe de la Radiotéléphonie, les appareils qu'elle met en œuvre, ses avantages, ses difficultés et son avenir, autant qu'on peut le prévoir dès maintenant.

Tout en cherchant à exposer le côté technique de la question avec netteté et rigueur, le capitaine Toché s'est abstenu volontairement d'entrer dans les développements analytiques trop longs. Au point de vue pratique, le lecteur trouvera un certain nombre de descriptions d'appareils industriels ainsi que des renseignements sur leur réglage et leur fonctionnement.

Enfin, dans un court Chapitre, l'auteur donne un aperçu des applications actuelles de la Radiotéléphonie ; il laisse espérer que d'ici peu d'années les progrès réalisés permettront d'entrevoir, pour cette branche nouvelle des communications hertziennes, un domaine considérable.

La Force motrice électrique dans l'industrie, par Eugène Marec, Ancien élève des Ecoles nationales d'Arts et Métiers, Ingénieur diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité, avec une préface de Paul Janet, Directeur du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Electricité. Un volume 25 cm × 16 cm de 614 pages avec 541 figures. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Le but de l'ouvrage est de guider l'ingénieur ou l'industriel dans l'installation et l'organisation rationnelle des services de force motrice électriques d'usines. Voici les principales divisions de ce travail, qui permettent de se rendre compte du programme qui a été suivi : Principes du moteur électrique. — Moteurs à courant continu. — Moteurs à courants alternatifs. — Caractéristiques mécaniques des moteurs. — Caractéristiques électriques des moteurs. — Caractéristiques économiques des moteurs. — Choix du matériel. — Achat du matériel. — Installation des moteurs. — Contrôle du matériel. — Réparations. — Canalisations de l'énergie électrique. — Contrôle des canalisations et recherche de défauts. — Portes de transformation. — Achat de l'énergie électrique. — Production d'énergie de secours. — Commande des appareils absorbant des puissances élevées sous des vitesses variables. — Commandes diverses. — Transmission. — Divers.

L'ouvrage, écrit par un praticien averti et parfaitement au courant de l'utilisation industrielle de l'énergie électrique, constitue un ensemble original de documentation.

IL Y A TRENTE ANS

Sur les conditions de couplage des alternateurs (M. A. Blondel). — Appareils à adhérence magnétique (suite et fin) (M. de Bovet).

Le Gérant : J. Guyot.

Engineering
Library

JUL 13 1923

TOME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 22.

FÉVRIER 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.
Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS
SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
ÉDITEUR
12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES.

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la Propulsion des Navires.

Puissance totale des turbines
installées en France
par la Compagnie Electro-Mécanique
et ses Licenciés,
plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu
et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commuatrices.

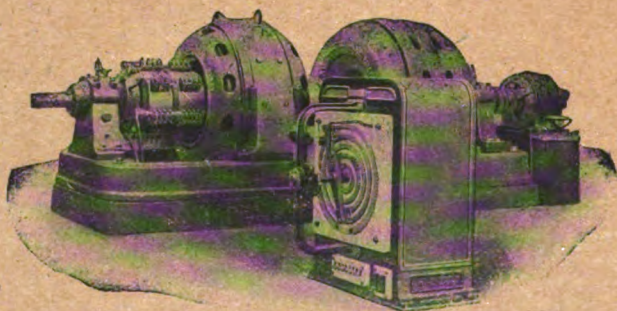
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 7 février 1923 :
Admission de membres titulaires, p. 41. — Un générateur moderne de rayonnement X (M. SAGER), p. 43. — Transformateurs d'intensité compoundés (M. ILIOVICI), p. 55.

NÉCROLOGIE: Adrien Bochet, p. 71.

INFORMATIONS, p. 75.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 78.

BIBLIOGRAPHIE, p. 79.

IL Y A TRENTE ANS, p. 80.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 7 février 1923. (1)

Présidence de M. MARCEL BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Arhanchiague (Francis), Elève à la Section de Radiotélégraphie de l'E. S. E., 2, rue d'Odessa, à Paris (14°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Delaruelle (Jacques-Joseph), Ingénieur aux Etablissements Caillard et M. Heuzy, 10, rue Alibert, à Paris (10°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Fedoroff (Nicolas), Elève à la Section de Radiotélégraphie de l'E. S. E., 79, boulevard Saint-Michel, à Paris (5°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Klat** (Elie), Ingénieur électricien, 27, rue Mosquée Attarine c/o A S R Klat et Cie, à Alexandrie (Egypte).
- Liwski** (Jean-François), Ingénieur E. P. C. I., Ingénieur aux Anciens Etablissements R. Cornély et Cie, 117, rue Notre-Dame-des-Champs, à Paris (6°). — Présenté par MM. M. Leblanc et H. Jouvion.
- Arnoux** (André), Directeur des Etablissements Chauvin et Arnoux, 45, rue du Ranelagh, à Paris (16°). — Présenté par MM. R. Arnoux et L. Pailier.
- Esnault** (Louis-Emile-Georges), Ingénieur E. S. E., 22, rue Rieussec, à Viroflay (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Bruzeau** (Ernest-Albert-Marco), Elève à l'E. S. E., 43, rue Claude-Bernard, à Paris (5°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Cruais** (Pierre-Désiré), Elève à l'E. S. E., 1 bis, rue Plumet, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Debomy** (Louis-Albert), Elève à l'E. S. E., 72, boulevard Saint-Germain, à Paris (5°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Dubost** (Robert-Auguste), Elève à l'E. S. E., 8, rue Edme-Guillout, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Duverne** (Jacques-Jean), Elève à l'E. S. E., 143, boulevard Raspail, à Paris (6°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Fauillon** (René-Joseph), Elève à l'E. S. E., 11, rue Andrieux, à Paris (8°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Forest** (Léon-Jean-Ernest), Elève à l'E. S. E., 39, rue du Lycée, à Sceaux (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Fortuna** (Juan), Ingénieur radioélectricien, 145, avenue de Suffren, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Lapret** (Alexandre-Louis), Elève à l'E. S. E., 6, rue José-Maria-de-Hérédia, à Paris (7°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Lhoste** (Auguste), Elève à l'E. S. E., Select Hotel, rue Plumet, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Dehals** (André-Charles-Joseph), Elève à l'E. S. E., 40 bis, rue Rivay, à Levallois-Perret (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Léonard** (Maurice-Jean), Elève à l'E. S. E., 4 bis, Allée Antoine-Grossin, à Clamart (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Marty** (Georges-Abel), Elève à l'E. S. E., 6, place de Vaugirard, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Popesco** (Alexandre), Elève à l'E. S. E., commandant du génie, 11, rue de Vaugirard, à Paris (6°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Sprecher** (André), Elève à l'E. S. E., 13, rue Nicolas-Charlet, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Tohen** (Tsou-hiai), Elève à l'E. S. E., 8, rue Edme-Guillout, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Voisin** (Jacques-Alfred), Elève à l'E. S. E., 18, rue de Lorraine, à Saint-Germain-en-Laye (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Delye** (Pierre), Elève à l'E. S. E., 13, rue Michel-Charles, à Paris (12°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Lachambre** (Hippolyte), Elève à l'E. S. E., 181, rue de Vaugirard, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Ricard** (Jean), Elève à l'E. S. E., 21, avenue de la Marguerite, au Vésinet (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Siguler** (Jacques), Elève à l'E. S. E., 12, rue Saint-Louis, à Melun (Seine-et-Marne). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

UN GÉNÉRATEUR MODERNE DE RAYONNEMENT X

Relations entre le spectre du rayonnement X et le courant électrique générateur. — Avantages du courant continu haute tension. — Sa production par redressement d'un courant alternatif haute tension. — Description d'un générateur à 250 000 volts (tension constante). — Mesures du potentiel et de l'intensité du courant continu haute tension. — L'ampoule radiogène. — Protection contre le rayonnement X. — Mesure de l'intensité du rayonnement X.

M. SAGET. — « Le rayonnement X était exclusivement produit, il y a peu de temps encore, avec des bobines d'induction ou des redresseurs mécaniques synchrones pouvant donner des tensions jusqu'à 125 000 volts.

» Les applications thérapeutiques actuelles et notamment la radiothérapie profonde pour le traitement des néoplasmes ont contribué au développement particulier du rayonnement X puissant, produit avec des tensions très élevées. Ce rayonnement, où dominent les courtes longueurs d'onde, est, en effet, moins absorbé par les corps en général et par les tissus humains en particulier. Il peut donc pénétrer plus profondément sans léser les couches superficielles des tissus.

» C'est spécialement pour répondre à cet emploi qu'a été réalisé le générateur à très haute tension, construit par les Etablissements Gaiffe-Gallot, Pilon, et dont je vous ferai la description ici.

» Ce générateur produit une tension continue constante qui présente un important avantage par rapport à la tension continue ou redressée intermittente correspondant au courant de la bobine d'induction ou du commutateur tournant synchrone.

» On sait que la longueur d'onde minimum d'un rayonnement X dépend de la tension appliquée aux bornes de l'ampoule radiogène V . Elle est donnée approximativement par la formule :

$$\lambda_0 = \frac{12,34}{V},$$

λ_0 étant exprimée en unités Angstrom et V , en kilovolts.

» D'autre part, le maximum d'intensité dans le spectre correspond à la longueur d'onde :

$$\lambda_{\max} = 1,304 \lambda_0.$$

» Il est évident que, pour un courant constamment variable, la longueur d'onde obtenue dépendra des longueurs d'onde qui se

déduiront des différentes valeurs instantanées de la tension aux bornes de l'ampoule.

» Dans ces conditions, le maximum d'intensité du spectre de rayons X, correspondra à une longueur d'onde résultante plus grande que précédemment et donnée expérimentalement par la formule :

$$\lambda_{\max} = 1,304 \lambda_0 + 0,05,$$

λ_0 correspondant à la longueur d'onde minimum du potentiel maximum.

» Par exemple, dans le cas où l'ampoule radiogène est alimentée par une bobine d'induction de 40 cm d'étincelle équivalente, soit environ 200 kilovolts, on a une longueur d'onde :

$$\lambda_0 = \frac{12,34}{200} = 0,0617 \text{ Angstrom.}$$

$$\begin{aligned} \text{et } \lambda_{\max} &= 1,304 \times 0,0617 + 0,05 \\ &= 0,0805 + 0,05 \\ &= 0,1305 \text{ Angstrom.} \end{aligned}$$

» On voit immédiatement l'importance du facteur additif 0,05 et l'intérêt du courant continu qui permet d'abaisser, de 0,1305 à 0,0805 Angstrom, la longueur d'onde d'intensité maximum.

» Les générateurs de courant continu à haute tension que l'on peut envisager sont peu nombreux.

» Il ne faut pas songer à la machine statique dont la puissance actuelle et le rendement sont trop faibles, ni aux machines dynamos, ni aux batteries d'accumulateurs dont l'isolement serait pratiquement impossible.

» Reste donc l'utilisation du courant alternatif à haute tension que l'on obtient facilement à l'aide de transformateurs statiques.

» La transformation du courant alternatif à haute tension en courant continu peut être réalisée à l'aide de redresseurs et de condensateurs.

» Mais il est indispensable que le redresseur envisagé charge le condensateur en s'opposant à tout courant de décharge. Or, pour un courant sinusoïdal, la durée de passage du courant de charge devra être variable selon le potentiel et l'état de charge du condensateur, ce qui ne peut être obtenu que très difficilement par des procédés de commutation mécanique.

» Au contraire, l'utilisation de soupapes pour la charge des condensateurs sur courant alternatif donne une solution parfaite

du problème : le courant alternatif charge le condensateur pendant tout le temps où la différence de potentiel de la source est plus élevée que celle du condensateur et s'oppose absolument à la décharge de ce dernier lorsque le potentiel s'est abaissé à une valeur inférieure.

» Le kénotron, en particulier, convient à cet emploi. Le modèle actuel peut supporter pratiquement 150 kilovolts. Sur courant alternatif, il peut donc charger un condensateur à la tension de 75 kilovolts.

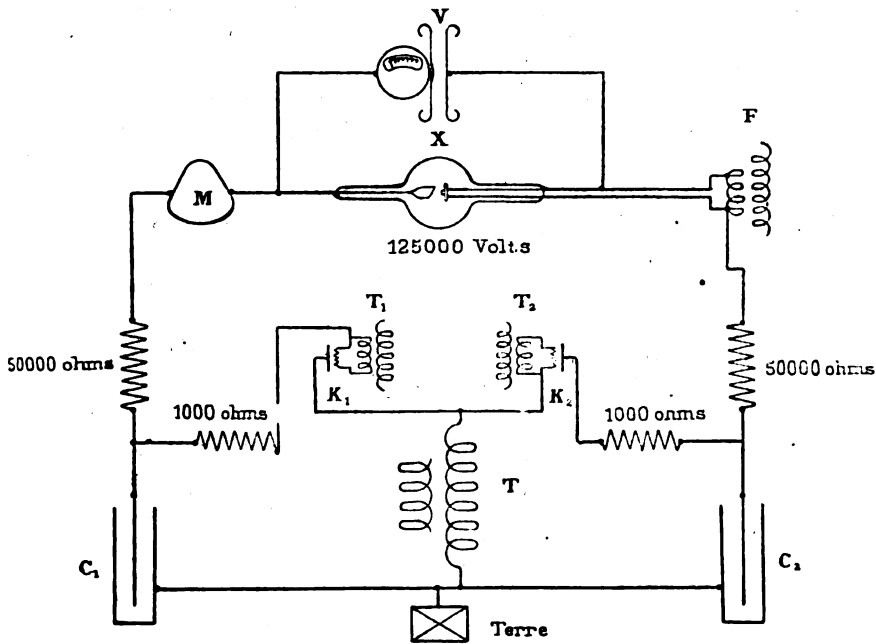


Fig. 1. — Schéma de montage donnant un courant continu à la tension de 125 000 volts.

» En montant deux condensateurs en série et en les chargeant séparément chacun par un kénotron, suivant le montage indiqué sur la figure 1, on peut obtenir du courant continu à une tension de 150 kilovolts sans que la différence de potentiel aux bornes de chaque kénotron soit jamais supérieure à ce qu'il peut supporter normalement.

» On remarque sur ce schéma : en T , le transformateur à haute tension; en C_1 et C_2 les condensateurs qui ont à résister à une tension continue de 75 kilovolts chacun. K_1 et K_2 représentent les deux kénotrons dont les filaments cathodiques sont ali-

mentés par les secondaires des transformateurs T_1 et T_2 , dont les primaires sont branchés sur le courant alternatif à 110 ou 220 volts. Ces secondaires isolés pour 75 kilovolts par rapport au sol fournissent un courant de 7 ampères sous 7 volts, nécessaire au chauffage du filament.

» On voit en X l'ampoule radiogène du type Coolidge, dont le filament cathodique est alimenté par le transformateur F. M re-

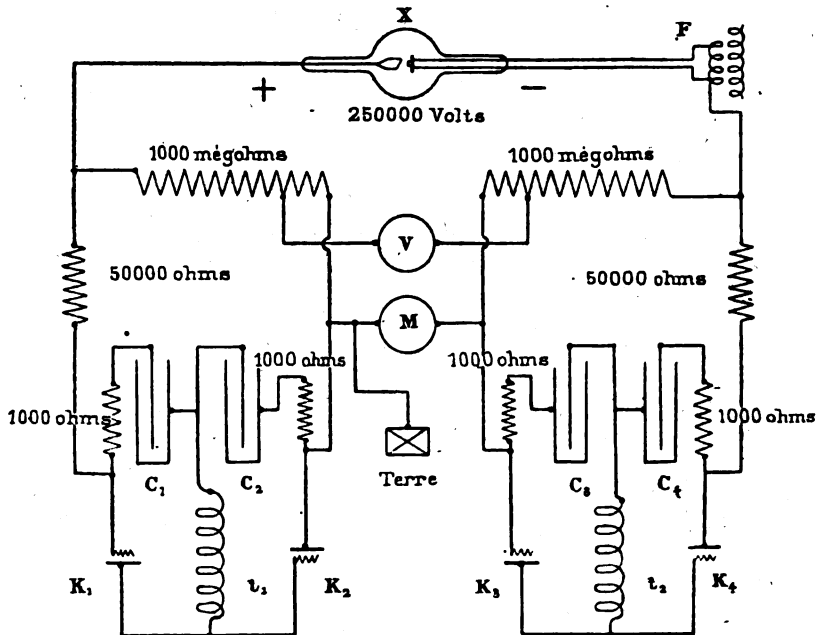


Fig. 2. — Schéma de montage donnant un courant continu à la tension de 250 000 volts.

présente le milliampèremètre destiné à mesurer l'intensité du courant à haute tension traversant l'ampoule radiogène.

» V représente un voltmètre électrostatique d'Abraham et Villard mesurant le potentiel aux bornes.

» En divers endroits sont placés des résistances destinées à amortir toute oscillation susceptible de s'amorcer.

» On remarquera que l'une des ondes chargera le condensateur C_1 et l'autre onde chargera le condensateur C_2 , ce qui présente un important avantage au double point de vue de la régularité du courant continu produit et de l'utilisation du courant alternatif.

» Dans le but de réduire au minimum cette variation du potentiel et d'obtenir une bonne stabilité de fonctionnement, une bobine de self-induction est placée en série avec le primaire du transformateur et le réglage de la tension s'effectue par variation de la valeur de sa réactance de self-induction.

» En disposant deux générateurs identiques à ce dernier, on peut obtenir une tension deux fois plus grande. C'est un des montages préconisés par M. Marius Latour et réalisé dans le dispositif représenté schématiquement figure 2.

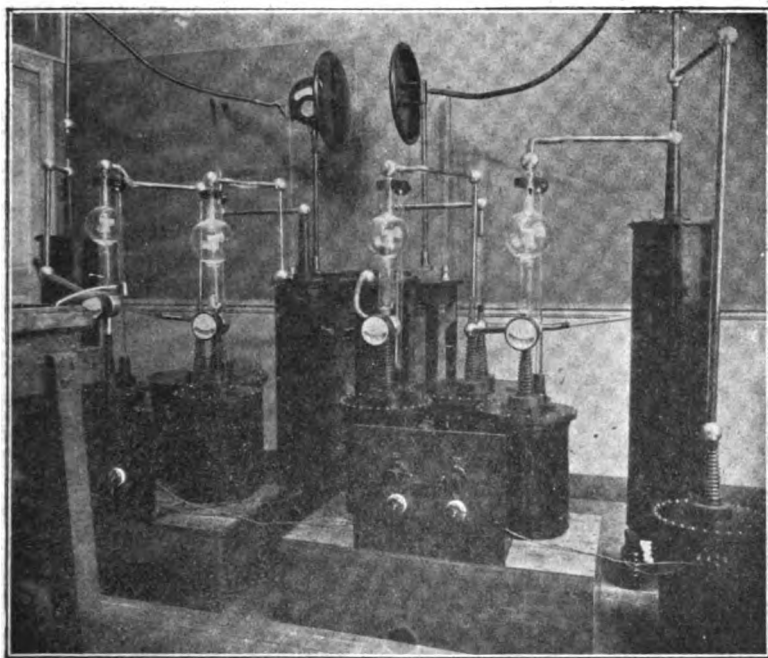


Fig. 3. — Vue montrant la disposition des appareils pendant les premiers essais.

T_1 et T_2 sont les transformateurs à haute tension donnant 75 kilovolts ;

» C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , les condensateurs à haute tension de capacité 0,02 microfarad environ ;

» K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , les kénotrons de charge ;

» X, l'ampoule radiogène avec son transformateur F, pour le chauffage du filament.

» Le milliampèremètre destiné à la mesure de l'intensité du courant à haute tension est disposé entre les conducteurs mé-

du courant continu est de 250 kilovolts, soit 62,5 kilovolts par condensateur. Il en résulte une déformation de la courbe de charge qui prolonge la durée de passage du courant. Par suite, la durée de la décharge se trouve abrégée d'autant, ce qui augmente la constance de la tension continue obtenue.

» Ce générateur est capable de fournir une intensité de 10 milli-

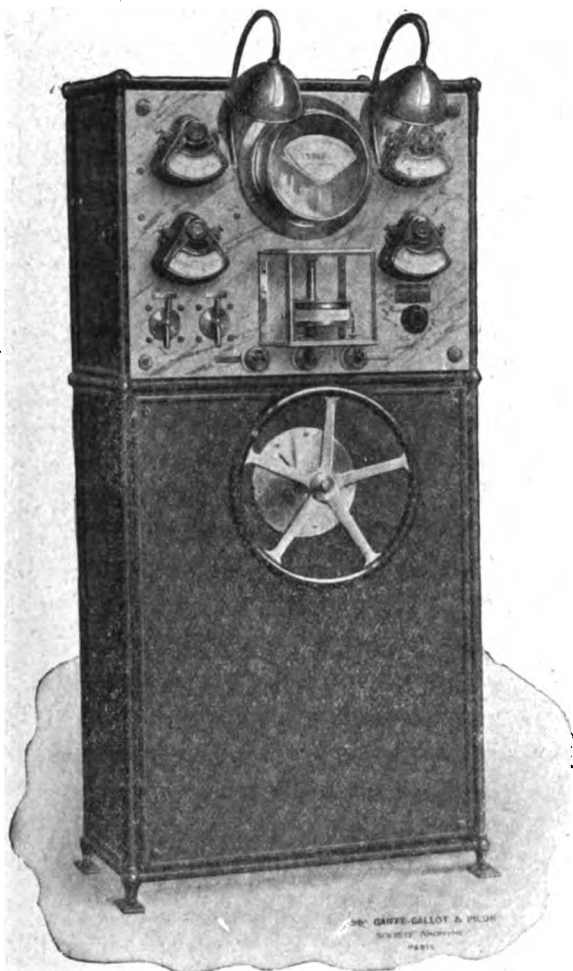


Fig. 5. — Vue du tableau de commande.

ampères sous 250 kilovolts. La variation de tension dans ces conditions, avec les capacités indiquées, sur un courant alternatif à 50 périodes par seconde, est inférieure à 5 pour 100.

» La figure 3 montre le générateur réalisé suivant ces principes pour les premiers essais. Il est facile d'y reconnaître les divers éléments précédemment énoncés.

» La figure 4 représente la forme pratique de ce générateur, enfermé dans une enceinte grillagée évitant tout contact accidentel.

» La figure 5 montre l'aspect du tableau de commande. On y reconnaît, au centre, l'électromètre et, au-dessous, dans une cage vitrée, un microampèremètre destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement X à l'aide de l'intensionomètre que nous décrirons ultérieurement. Le tableau comporte aussi les ampèremètres et voltmètres des circuits primaires, le milliampèremètre indiquant le courant à haute tension, le bouton de réglage du rhéostat permettant de faire varier l'intensité du courant dans le filament de l'ampoule Coolidge et, par suite, l'intensité du courant à haute tension pouvant traverser cette ampoule.

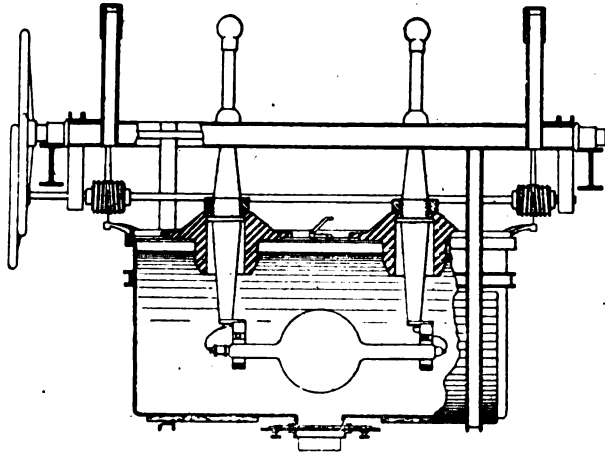


Fig. 6. — Coupe de la cuve protégeant l'ampoule.

» Enfin, à la partie inférieure du panneau, un grand volant pour le réglage de la self-induction du circuit primaire et, par suite, du potentiel du courant continu à haute tension.

» Ainsi qu'il a été dit précédemment, la puissance disponible en courant continu est de 250 kilovolts sous 10 milliampères, soit 2,5 kilowatts.

» Une telle énergie absorbée dans une ampoule radiogène produit une intensité de rayonnement considérable. Il est essentiel de protéger le voisinage contre des effets nuisibles, tout en permettant le refroidissement de l'ampoule radiogène.

» A cet effet, celle-ci est plongée dans une cuve de plomb remplie d'huile (fig. 6 et 7) suspendue à un chariot pouvant se

déplacer facilement sur un pont roulant. Des fenêtres garnies de plaques d'aluminium mince, transparent aux rayons X, permettent de placer les ajutages destinés aux traitements.

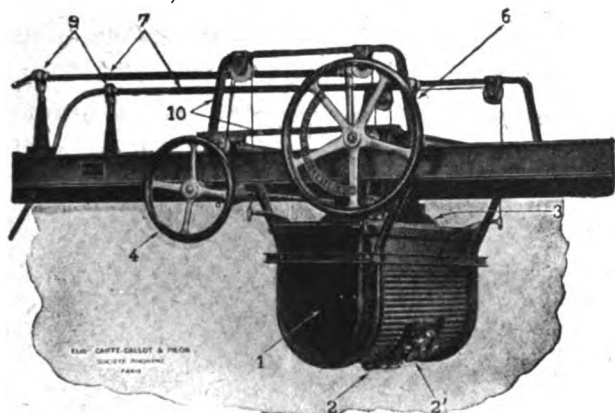


Fig. 7. — Vue du chariot porte-ampoule.

» Un petit treuil est prévu pour soulever facilement le couvercle de la cuve qui supporte les isolateurs et l'ampoule radio-gène (fig. 8).

» Le malade est placé sur une table d'opération que l'on peut

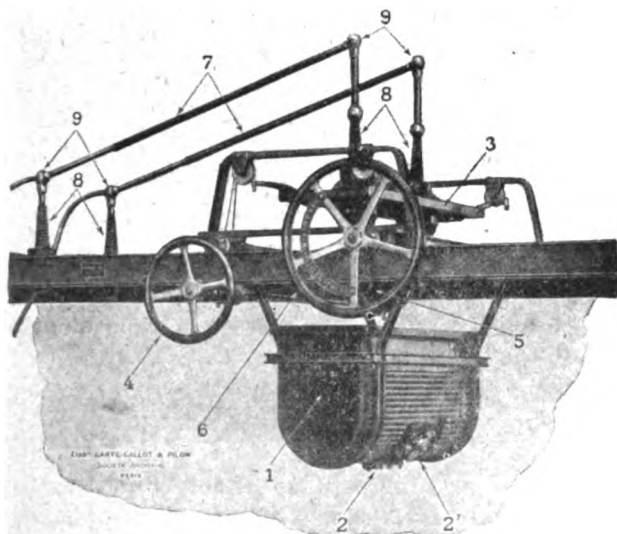


Fig. 8. — Vue du dispositif supportant l'ampoule et permettant le changement de celle-ci.

déplacer et incliner en tous sens. Les déplacements combinés de la cuve et de la table permettent d'obtenir toutes les orientations utiles (fig. 9).

« L'épaisseur du plomb des parois de la cuve est de 6 millimètres. Dans les conditions d'emploi indiquées, l'intensité du rayonnement traversant les parois est de $\frac{1}{27\ 600}$ du rayonnement émis, ce qui assure une protection suffisante du malade et des opérateurs.

» Cette cuve est complétée par un cône isolant intérieur, rempli

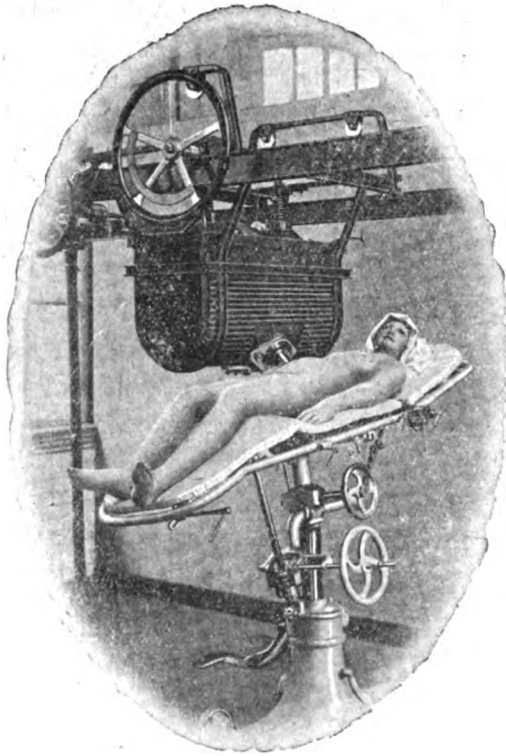


Fig. 9. — Vues de l'installation et de la table d'opération.

d'air sur le trajet du rayonnement X et destiné à éviter l'absorption due à l'huile.

» On place dans les fenêtres des filtres constitués par des plaques de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur de cuivre et d'aluminium, destinées à absorber les rayons de grande longueur d'onde, tout en laissant subsister en grande partie ceux de courte longueur d'onde.

» L'intensité du rayonnement X est mesurée à l'aide d'un appareil spécial dénommé intensionomètre.

» Il se compose (fig. 10) d'un cône métallique s'adaptant sur un des orifices de sortie du rayonnement X. A l'intérieur, sont disposées une série de lames parallèles en papier recouvert d'une mince couche de carbone. Ces lames, distantes de 1 cm et soigneusement isolées, sont alternativement reliées à deux bornes intercalées dans le circuit d'une batterie de piles de 100 volts environ, et un microampèremètre.

» Sous l'influence du rayonnement X, qui traverse facilement cet empilage, l'air s'ionise et, finalement, produit le passage d'un courant entre les plaques. C'est ce courant de l'ordre du micro-ampère qui est mesuré par le microampèremètre placé sur le

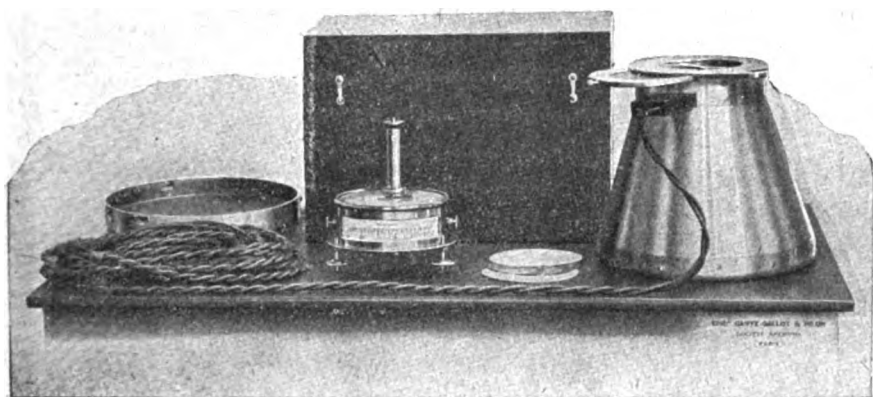


Fig. 10. — Vues du cône métallique et des appareils pour la mesure de l'intensité du rayonnement X.

tableau de commande. Or, cette intensité est proportionnelle à l'intensité du rayonnement X.

» Le rayonnement X à peine affaibli peut être utilisé pour les traitements dès la sortie du cône de l'intensionomètre.

» Ainsi, l'opérateur a sous les yeux tous les appareils donnant les constantes des courants à haute tension et à basse tension et aussi la mesure de l'intensité du rayonnement produit. Il peut donc effectuer tous les réglages nécessaires au bon rendement du générateur, puisqu'il a sous la main tous les accessoires convenables.

» La brève description de ce tout nouvel appareillage vous

donnera une idée de la puissance et du perfectionnement des générateurs actuels de rayonnement X destinés à la thérapeutique.

» Ils s'efforcent de réunir la précision des appareils de laboratoire à la puissance et à la sécurité de fonctionnement des appareils de l'industrie. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Saget.

TRANSFORMATEURS D'INTENSITÉ COMPOUNDÉS

Un transformateur d'intensité est caractérisé par le rapport des courants primaire et secondaire :

$$k = \frac{I_1}{I_2}$$

et par le déphasage ψ entre ces courants.

Dans un transformateur normal k et ψ sont variables avec I_1 , à cause de la variation de la perméabilité du circuit magnétique. Pour les faibles valeurs de I_1 , la perméabilité est faible; c'est pourquoi ψ prend des valeurs importantes, ce qui fausse les mesures de la puissance et de l'énergie, surtout pour les faibles valeurs du facteur de puissance.

Dans les transformateurs compoundés, on amène le fer du circuit magnétique à l'état correspondant du maximum de perméabilité, à l'aide d'un circuit parcouru par un courant constant et présentant un coefficient d'induction mutuelle nul par rapport aux circuits primaire et secondaire.

On réduit ainsi ψ à une valeur très faible et indépendante de I_1 , ce qui permet d'employer ce transformateur comme transformateur étalon de précision, ou encore de lui faire alimenter trois à quatre fois plus d'appareils qu'un même transformateur non compoundé tout en ayant, surtout pour les faibles valeurs de I_1 , des erreurs beaucoup plus faibles. Ces résultats sont obtenus avec une dépense dans le circuit de compoundage d'environ un watt.

M. ILIOVICI. — « Nous désignons sous le nom de transformateur d'intensité compoundé un transformateur de mesure de courant, qui comporte, en outre des enroulements principaux, primaire et secondaire, un enroulement, alimenté sous tension alternative de valeur efficace constante, dont le rôle est d'amener le fer du circuit magnétique à l'induction correspondant au maximum de perméabilité, sans induire des courants dans les circuits principaux.

» Cet enroulement auxiliaire ou de compoundage devra donc avoir un coefficient d'induction mutuelle nul par rapport à chacun des circuits principaux.

» Pour faire bien comprendre le rôle de l'enroulement de compoundage, nous allons rappeler les propriétés essentielles et les conditions d'emploi des transformateurs d'intensité non compoundés.

» On sait qu'un transformateur d'intensité est formé d'un circuit magnétique en tôles de fer doux, ayant habituellement la forme cuirassée (fig. 1, M), dont le noyau central porte deux enroulements, habituellement concentriques, le secondaire S_1 S_2 étant placé à l'intérieur du primaire P_1 P_2 (fig. 1).

» L'enroulement primaire est monté en série dans le circuit, dont on veut mesurer le courant, la puissance ou l'énergie, tandis que l'enroulement secondaire est fermé sur les appareils de

mesure : ampèremètres, relais d'ampèremètres, gros fils de wattmètres, de compteurs ou de relais wattmétriques, dont l'ensemble constitue le circuit extérieur du secondaire.

» L'ensemble, enroulement du secondaire et son circuit extérieur, constitue le circuit secondaire.

» Soient n_1, n_2 , le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire ; i_1, I_1, i_2, I_2 , les valeurs instantanées et efficaces des courants ; $r_2 = r'_2 + r''_2$, la résistance totale du circuit secondaire, r'_2 étant la résistance de l'enroulement et r''_2 celle du circuit extérieur ; l_2 le coefficient de self-induction de dispersion de l'enroulement secondaire, l''_2 le coefficient de self-induction de son

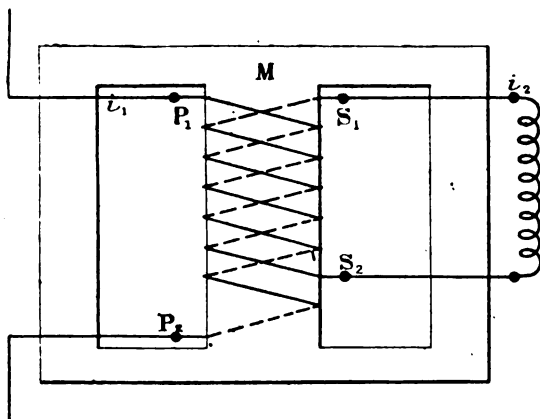


Fig. 1.

circuit extérieur, $l_2 = l'_2 + l''_2$ sera le coefficient de self-induction apparent du circuit secondaire ; φ , le flux commun aux deux enroulements, $\mathcal{R}$ la réluctance du circuit magnétique commun ; on a les relations :

$$(1) \quad 0 = r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt} - n_2 \frac{d\varphi}{dt}, \text{ pour le circuit secondaire, et}$$

$$(2) \quad \frac{\mathcal{R}}{4\pi} = n_1 i_1 - n_2 i_2, \text{ pour le circuit magnétique.}$$

» En supposant $\mathcal{R}$ constant pendant une période ⁽¹⁾, en dérivant la relation (2) par rapport à t et en éliminant φ entre la relation ainsi obtenue et la relation (1) on trouve la formule :

$$(3) \quad 0 = r_2 i_2 + \left(l_2 + \frac{4\pi n_2^2}{\mathcal{R}} \right) \frac{di_2}{dt} + \frac{4\pi n_1 n_2}{\mathcal{R}} \frac{di_1}{dt}.$$

⁽¹⁾ Nous verrons plus loin qu'on a le droit de considérer $\mathcal{R}$ constant pendant une période ; mais que la valeur de $\mathcal{R}$ est fonction de I_1 .

» De cette formule, on tire le diagramme de la figure 2, dans lequel on a :

$$OA = r_2 I_2, AB = \left(l_2 + \frac{4\pi n_2^2}{\mathcal{R}} \right) \omega I_2 \text{ et } BO = \frac{4\pi n_1 n_2}{\mathcal{R}} \omega I_1.$$

» Si on trace le vecteur $\overrightarrow{OI_1} = I_1$, et le vecteur $\overrightarrow{O(-I_2)} = -I_2$, on constate que le courant $(-I_2)$ est déphasé en avant par rapport à I_1 , d'un angle ψ égal au déphasage entre les vecteurs $\overrightarrow{BO}$ et $\overrightarrow{BA}$.

» Le diagramme (fig. 2) permet de trouver la relation entre I_1 et I_2 et par conséquent le rapport de transformation $k = \frac{I_1}{I_2}$ et l'angle de phase ψ .

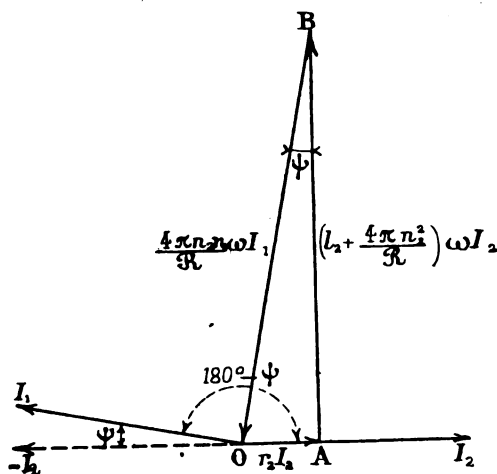


Fig. 2.

» On trouve, après simplification:

$$(4) \quad k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} \right)^2 + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{16 \pi^2 n_1^2 \omega^2}}.$$

et

$$(5) \quad \tan \psi = \frac{r_2}{\left[\frac{4\pi n_2^2}{\mathcal{R}} + l_2 \right]}. \text{ Or, } l_2 \text{ est faible devant } \frac{4\pi n_2^2}{\mathcal{R}}, \text{ on peut}$$

donc écrire :

$$(5) \quad \tan \psi = \frac{\mathcal{R} r_2}{4\pi n_2^2}.$$

» Nous allons mettre la formule (4) sous une forme se prêtant mieux à la discussion.

» On a :

$$k = \frac{n_2}{n_1} \left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} \right) \sqrt{1 + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{16\pi^2 n_2^4 \omega^2} \left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} \right)^2}$$

» Le second terme sous le radical n'est qu'un terme correctif ; d'autre part $\frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2}$ est faible devant 1 ; on peut donc le négliger, et on a :

$$k = \frac{n_2}{n_1} \left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} \right) \left(1 + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{16\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right)^{1/2}.$$

» En développant la deuxième parenthèse en série et en négligeant les termes à partir du troisième (termes complètement négligeables), on obtient :

$$k = \frac{n_2}{n_1} \left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} \right) \left(1 + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right).$$

» Si on effectue le produit des parenthèses, en négligeant le dernier terme, complètement négligeable, on a la formule définitive :

$$(4'') \quad k = \frac{n_2}{n_1} \left(1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right).$$

» Lorsque le transformateur sert à la mesure d'un courant, le rapport de transformation intervient seul.

» On peut choisir le nombre de spires des enroulements, de façon que pour une valeur de $I_{1,0}$ de I_1 (par exemple pour $I_{1,0} = 0,5 I_{1,n}$, $I_{1,n}$ étant le courant primaire normal), le transformateur soit exact, c'est-à-dire qu'il donne le courant secondaire $I_{2,0}$ voulu. Soit k_0 le rapport de transformation correspondant au courant $I_{1,0}$, et $\mathcal{R}_0$ la réluctance correspondante du circuit magnétique, on aura :

$$(4') \quad k_0 = \frac{I_{1,0}}{I_{2,0}} = \frac{n_2}{n_1} \left(1 + \frac{\mathcal{R}_0 l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}_0^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right).$$

tous les éléments du transformateur, autres que ω , étant pratiquement indépendants du courant I_1 .

» Si, maintenant, on fait fonctionner le transformateur avec un courant primaire I_1 quelconque et si le transformateur est exact, il donnera au secondaire un courant I_2 tel qu'on ait $\frac{I_1}{I_2} = k_0$ ou encore $k_0 I_2 - I_1 = 0$; mais si le transformateur n'est pas exact, il donnera un courant I_2 et l'erreur relative sera :

$$(6) \quad \varepsilon = \frac{k_0 I_2 - I_1}{I_1} = k_0 \frac{I_2}{I_1} - 1.$$

» Si on tient compte de la relation $k = \frac{I_1}{I_2}$, on obtient la relation :

$$(6') \quad \varepsilon = \frac{k_0}{k} - 1.$$

» En remplaçant k_0 et k par leurs valeurs tirées des relations (4'') et (4') on trouve :

$$\varepsilon = \frac{1 + \frac{\mathcal{R}_0 l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}_0 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2}}{1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2}} - 1;$$

en effectuant la division et en négligeant les termes d'ordre supérieur, on obtient :

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{\mathcal{R}_0 l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}_0^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right] \left[1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right] - 1.$$

» En effectuant le produit, en négligeant les termes d'ordre supérieur, et en réduisant, on obtient la formule

$$(7) \quad \varepsilon = \frac{(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R}) l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{(\mathcal{R}_0^2 - \mathcal{R}^2) r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2},$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$(7') \quad \varepsilon = \frac{(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R})}{4\pi n_2^2} \left[l_2 + \frac{(\mathcal{R}_0^2 + \mathcal{R}^2) r_2^2}{8\pi n_2^2 \omega^2} \right].$$

» Dans les conditions normales, le deuxième terme de la parenthèse est négligeable devant le premier et la formule (7') peut se mettre sous la forme :

$$(7'') \quad \varepsilon = \frac{(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R}) l_2}{4\pi n_2^2},$$

avec une approximation suffisante dans les conditions habituelles.

» Dans la mesure d'une puissance ou d'une énergie intervient aussi l'angle de phase ψ , qui joue un rôle d'autant plus important que le facteur de puissance ($\cos \varphi$) du circuit sur lequel on fait la mesure est plus petit.

» En effet, si W_1 est la puissance à mesurer et W_2 , celle indiquée par un wattmètre placé dans le secondaire du transformateur, U la différence de potentiel aux bornes de l'installation, entre lesquelles on monte le fil fin du wattmètre W_2 , on a :

$$(8) \quad W_1 = UI_1 \cos \varphi \quad \text{et} \quad (9) \quad W_2 = UI_2 \cos (\varphi - \psi) \quad [\text{voir fig. 3}].$$

» Si on adopte comme rapport de transformation la valeur particulière k_0 , la puissance primaire calculée sera : $W'_1 = k_0 W_2$ ou :

$$(10) \quad W'_1 = k_0 U I_1 \cos(\varphi - \psi)$$

et l'erreur dans la mesure d'une puissance sera :

$$(11) \quad \gamma = \frac{W'_1 - W_1}{W_1} = \frac{W'_1}{W_1} - 1.$$

» En remplaçant dans cette formule W_1 et W_2 par les valeurs données par les relations (8) et (10), on a :

$$\gamma = \frac{k_0 I_2}{I_1} \frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \varphi} - 1.$$

» Or, on a : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{k}$ et $\frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \varphi} = \cos \psi [1 + \tan \psi \tan \varphi]$, donc :

$$(10'') \quad \gamma = \frac{k_0}{k} \cos \psi [1 + \tan \psi \tan \varphi] - 1.$$

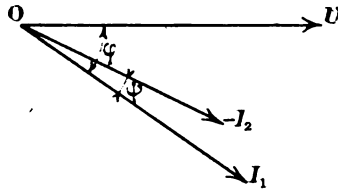


Fig. 3.

Or, d'après la formule (6') on a : $\frac{k_0}{k} = 1 + \varepsilon$, donc :

$$\gamma = (1 + \varepsilon) \cos \psi [1 + \tan \psi \tan \varphi] - 1.$$

» Mais $\cos \psi$ est très voisin de l'unité même, dans des conditions beaucoup plus défavorables que celles dans lesquelles fonctionnent les transformateurs d'intensité ; on peut donc écrire :

$$\gamma = (1 + \varepsilon) (1 + \tan \psi \tan \varphi) - 1;$$

en effectuant les opérations et en négligeant $\varepsilon \tan \psi \tan \varphi$, on trouve :

$$(10') \quad \gamma = \varepsilon + \tan \psi \tan \varphi.$$

» En remplaçant ε et $\tan \psi$ par leurs valeurs données par les formules (7'') et (5'), on obtient la relation :

$$(10''') \quad \gamma = \frac{(R_0 - R) I_2}{4 \pi n_1^2} + \frac{R r_1}{4 \pi n_1^2 \omega} \tan \varphi.$$

» *Remarques.* — 1° D'après la façon de définir les erreurs ε et γ , on déduit que les appareils montés sur transformateurs avancent lorsque ε ou γ sont positifs et retardent pour ε et γ négatifs.

» 2° Pour $\cos \varphi = 1$ on a $\tan \varphi = 0$, donc (formule 10'') : $\eta = \varepsilon$. Il en résulte que l'erreur dans la mesure d'une puissance est pour $\cos \varphi = 1$, égale à l'erreur dans la mesure d'un courant.

» 3° La réluctance $\mathcal{R}$ du circuit magnétique du transformateur dépend de la perméabilité μ du fer ; or, cette perméabilité est variable avec l'induction tandis que dans nos calculs nous supposons $\mathcal{R}$ constante (donc μ constant). Il est facile de montrer que μ est pratiquement constant pour un courant I_2 donné ; mais qu'il a une valeur différente pour chaque valeur de I_2 . Nous allons montrer aussi que la valeur de μ est celle donnée par le perméamètre pour $\mathcal{B}_{\max}$.

» On sait, en effet, que la perméabilité μ mesurée au perméamètre est celle qui correspond aux sommets des cycles d'hystérésis ; or, pour les faibles inductions qui interviennent dans les transformateurs d'intensité, les cycles d'hystérésis sont pratiquement des ellipses et pour la très bonne tôle employée ces cycles sont très étroits et peuvent être considérés comme des droites. La perméabilité est donc pratiquement constante pour un cycle donné et égale à celle qui correspond à $\mathcal{B}_{\max}$. Mais les divers cycles sont plus ou moins inclinés et correspondent donc à des valeurs différentes de μ .

» Ces conclusions ont été vérifiées par l'expérience suivante :

» En partant d'une courbe de perméabilité du fer d'un transformateur d'intensité on a calculé ε et η par les formules (7'') et (10''') ; on a ensuite déterminé les mêmes quantités par des expériences directes, et on a trouvé que les résultats concordaient très bien même pour $\cos \varphi = 0,3$.

» 3° L'induction $\mathcal{B}_{\max}$ peut être déterminée à l'aide de la formule (1). De cette formule, on tire immédiatement :

$$\Phi_{\max} = \frac{I_2 \sqrt{2} \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2}}{n_2 \omega},$$

d'où :

$$(11) \quad \mathcal{B}_{\max} = \frac{I_2 \sqrt{2} \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2}}{n_2 \omega s},$$

s étant la section du fer supposée uniforme.

» 4° L'induction maximum dans les transformateurs d'intensité fonctionnant dans les conditions habituelles, est de l'ordre de 500 à 1 000 gauss, pour le courant normal.

» Ces inductions sont inférieures à celles qui correspondent au maximum de perméabilité, celle-ci ayant lieu pour une induction de l'ordre de 4 000 à 6 000 gauss. Il en résulte que, dans un transformateur d'intensité, la perméabilité croît avec l'induction et, par conséquent, avec le courant secondaire (voir formule 11).

» *Discussion.* — Formes des courbes d'erreurs ε et η . — Nous pouvons maintenant discuter les formules (5'), (7''), (10'') et (10''').

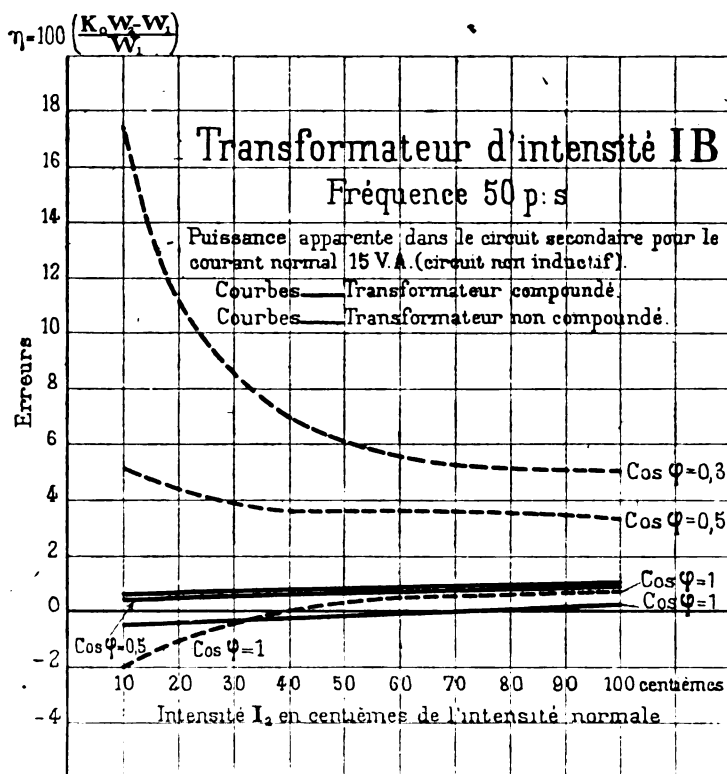


Fig. 4.

» De la remarque 4° il résulte que, dans la formule (7''), on a $\mathcal{R} < \mathcal{R}_0$ pour $I_2 > I_{2,0}$ et $\mathcal{R} > \mathcal{R}_0$ pour $I_2 < I_{2,0}$, $\mathcal{R}$ variant dans le sens inverse de la perméabilité ; de cette remarque et de la formule (7''), il résulte que l'erreur ε dans la mesure d'un courant sera positive pour $I_2 > I_{2,0}$ et négative pour $I_2 < I_{2,0}$. De plus, l'erreur sera d'autant plus grande que I_2 diffère plus de $I_{2,0}$. En regardant la question de plus près, on trouve que l'erreur ε varie surtout plus rapidement vers les faibles courants. Ces conclusions sont conformes aux résultats indiqués dans la courbe en pointillées marquée

$\cos \varphi = 1$ dans la figure 4, dans laquelle on a pris $I_{1,0} = 0,4 I_1$ normal.

» On rencontre la même forme de courbe dans tous les transformateurs de construction courante.

» La formule (5') montre que $\tan \psi$ varie proportionnellement à R . L'angle ψ étant habituellement très petit, il est pratiquement égal à sa tangente ; il en résulte que ψ varie proportion-

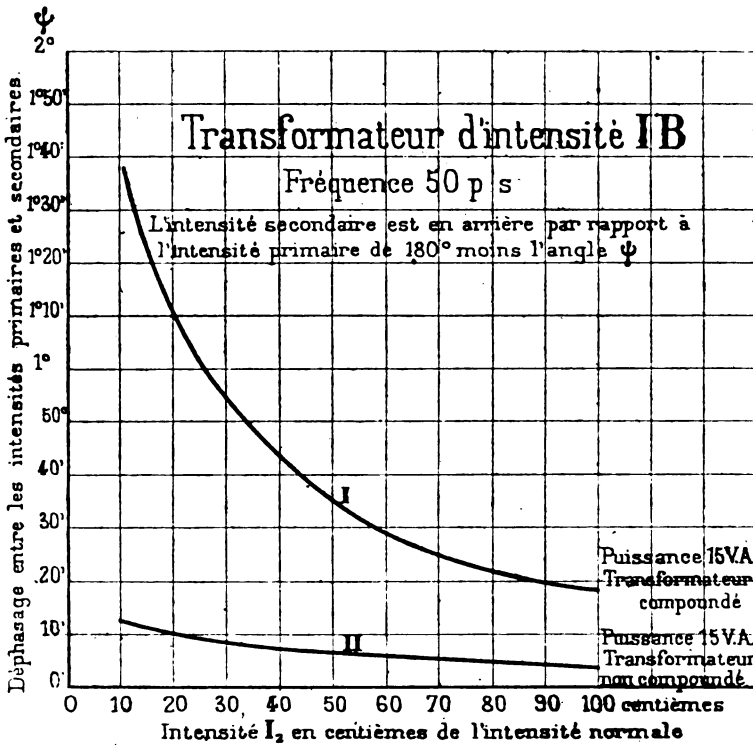


Fig. 5.

nellement à R . Or, dans la région qui intéresse les transformateurs d'intensité, la courbe de R en fonction de $R_{\max}$ (donc de I_2) est presque une hyperbole équilatère ; il en sera donc de même pour ψ .

» Cette conclusion est confirmée par les résultats indiqués sur la courbe 1 de la figure 5.

» La formule (10'') montre que l'erreur η dans la mesure d'une puissance est la somme de deux termes: ε et $\tan \psi \tan \varphi$. Tant que $\tan \varphi$ est faible, c'est-à-dire $\cos \varphi$ voisin de 1, le premier terme

domine et la courbe d'erreurs tourne sa concavité vers le bas. Mais pour les $\cos \varphi$ assez faibles, donc $\tan \varphi$ assez grands, l'influence de $\tan \phi$ est dominante et la courbe γ prend une forme hyperbolique de plus en plus prononcée, la concavité tournée vers le haut, γ étant positif. Ces résultats sont visibles sur les courbes en pointillées marquées $\cos \varphi = 0,5$ et $\cos \varphi = 0,3$ de la figure 4.

» Ces formes de courbes sont caractéristiques des transformateurs d'intensités ; il en résulte que les erreurs introduites par un transformateur sont d'autant plus grandes que le courant secondaire est plus faible.

» Les formules (7'') et (10'') montrent qu'on peut calculer un transformateur ayant des erreurs faibles pour le courant normal : le résultat le plus efficace est obtenu en augmentant le nombre de spires secondaires n_2 ; on peut aussi augmenter la section du fer. On est limité par le prix et le poids de l'appareil et par l'échauffement.

» Dans tous les cas, les erreurs en courant faible seront beaucoup plus grandes qu'en courant normal. On aura toujours des courbes de la forme de celles de la figure 4.

» Pour les besoins industriels, les erreurs en courant faible sont souvent peu gênantes ; mais il n'en est pas toujours ainsi. Par exemple, lorsque le transformateur doit alimenter des compteurs, on peut être gêné par les erreurs aux faibles charges.

» Pour un transformateur donné, les erreurs sont d'autant plus grandes que le transformateur alimente plus d'appareils ; il en résulte qu'on ne doit pas demander à un transformateur d'intensité une puissance supérieure à celle indiquée par le constructeur ; on risque d'avoir des erreurs inadmissibles.

» TRANSFORMATEURS COMPOUNDÉS. — On a cherché des artifices permettant de réduire les valeurs des erreurs ε et γ sans augmenter d'une façon exagérée les dimensions et le prix des transformateurs ; on a employé dans ce but des condensateurs en dérivation avec le circuit extérieur du secondaire, ou alimentés par un troisième enroulement ; des résistances en dérivation sur l'enroulement primaire, dont on a exagéré la dispersion magnétique, etc... Ces artifices ont pour résultat la diminution de l'angle de phase ϕ pour le courant normal, mais n'empêchent pas la variation de la réluctance $\mathcal{R}$ avec le débit, ni son influence sur le rapport de transformation et sur l'angle ϕ , donc sur les erreurs ε et γ .

» La Compagnie pour la Fabrication des Compteurs emploie un artifice qui permet d'obtenir des transformateurs à réluctance $\mathcal{R}$ du circuit magnétique pratiquement constante, indépendante du courant I_2 , et ayant, pour un transformateur donné, la plus petite valeur possible.

» Dans ce dispositif on amène le fer du circuit magnétique du transformateur à une induction correspondant à la perméabilité maximum, à l'aide d'un circuit auxiliaire alimenté sous une tension de valeur efficace constante et habituellement de même fréquence que le courant à mesurer. Les ampères-tours résultants dans le transformateur, c'est-à-dire ceux produits par les courants primaire et secondaire, même en plein débit, étant faibles devant les ampères-tours de compoundage (environ $1/5$), l'influence du courant I_2 (ou I_1) sur l'induction maximum dans le fer est faible ; de plus, comme on se trouve dans le voisinage du maximum de perméabilité, celle-ci varie très peu et aussi la réluctance $\mathcal{R}$.

» Le circuit de compoundage est d'ailleurs disposé de façon qu'il n'induisse aucun courant dans les circuits principaux (son coefficient d'induction mutuelle est nul par rapport à chacun de ces circuits).

» Les figures 4, 5 et 6 permettent de se rendre compte de l'effet du compoundage sur le fonctionnement d'un transformateur d'intensité, de construction courante.

» Dans la figure 4 les courbes en pointillées donnent les erreurs η introduites dans la mesure d'une puissance pour un transformateur d'intensité industriel de construction courante, non compoundé. On voit que, pour $\cos \varphi = 1$ l'erreur varie de -2 pour 100 à $+1$ pour 100, lorsque le courant varie de 10 pour 100 à 100 pour 100 du courant normal ; pour $\cos \varphi = 0,3$ ces erreurs deviennent respectivement $+17$ pour 100 à $+5$ pour 100 environ.

» La puissance fournie par ce transformateur pour le courant normal était de 15 v-A, valeur considérée comme puissance normale.

» Les courbes en traits pleins donnent les erreurs η pour le même transformateur, fonctionnant dans les mêmes conditions, sauf qu'on a fait passer un courant approprié dans le circuit de compoundage. Il résulte de ces courbes que les valeurs de η sont inférieures à $+1$ pour 100 entre 10 pour 100 et 100 pour 100 du

courant normal et quel que soit le $\cos \varphi$ dans les limites pratiques ($\cos \varphi \geq 0,3$).

» L'allure des courbes montrent que les erreurs doivent rester dans les mêmes limites pour des courants plus faibles : nous avons pu le vérifier jusqu'au 40^e du courant normal.

» Le transformateur compoundé ci-dessus peut être employé comme transformateur étalon. Les meilleurs transformateurs

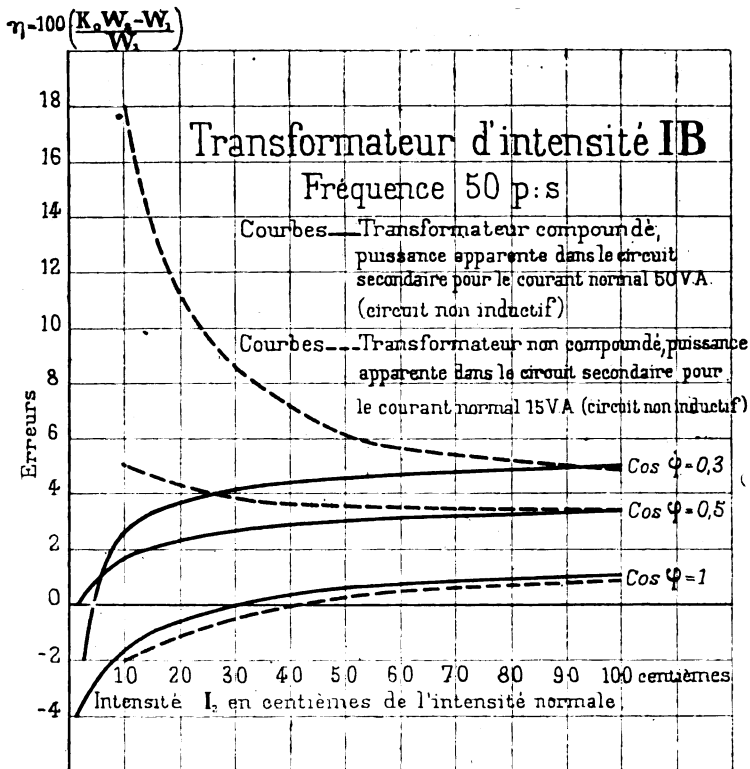


Fig. 6.

étalons ne donnent pas d'erreurs si faibles, surtout pour les faibles courants.

» Les courbes (fig. 4) permettent donc de juger de l'efficacité du compoundage d'un transformateur en ce qui concerne ses qualités techniques ; ajoutons à cela que le dispositif de compoundage est très simple (voir plus loin figures 7 et 8) et que sa consommation n'est que de 3 à 4 watts pour les transformateurs actuels et de 1 watt pour les nouveaux transformateurs en étude.

» Les courbes (fig. 5) indiquent, à titre de renseignement, les

valeurs de l'angle ϕ pour le même transformateur fonctionnant dans les mêmes conditions que ci-dessus. Ces courbes montrent que l'angle ϕ qui varie entre 18° pour le courant normal et $1^\circ 37'$ au dixième de ce courant, lorsque le transformateur n'est pas compoundé, prend, pour le transformateur compoundé, des valeurs comprises entre $4'$ et $12'$ — valeurs tout à fait faibles.

» Les courbes de la fig. 6 concernent le même transformateur dé-bitant sur un circuit tel que la puissance qu'il fournit, pour le courant normal, est de 50 v-A pour le transformateur compoundé (traits pleins) et 15 v-A seulement pour le transformateur non compoundé (pointillés).

» Il résulte de ces courbes un autre résultat pratique du compoundage. Pour les mêmes erreurs en courant normal un transformateur compoundé permet d'alimenter des appareils demandant trois fois plus de puissance que pour le même transformateur non compoundé ; de plus, même dans ces conditions, les erreurs aux faibles courants sont beaucoup plus faibles dans le premier cas que dans le second.

» Il en résulte qu'un transformateur compoundé peut remplacer trois transformateurs non compoundés, tout en donnant de meilleurs résultats techniques aux faibles courants.

» Ce résultat a un grand intérêt au point de vue industriel, le transformateur compoundé ayant le même encombrement que le transformateur non compoundé de même type et son prix n'étant que légèrement supérieur.

» L'emploi du transformateur compoundé permet donc une grande économie et un faible encombrement ; un tel transformateur pourrait souvent remplacer jusqu'à trois transformateurs non compoundés ; on simplifie aussi, par l'emploi d'un seul appareil, le montage des circuits et des appareils de mesure.

» *Dispositifs de compoundage.* — Parmi les dispositifs possibles pour le compoundage des transformateurs d'intensité, la Compagnie des Compteurs a employé successivement les deux suivants :

» Dispositif A ⁽¹⁾. Dans ce dispositif, qui s'applique aussi bien aux transformateurs à noyau simple — rectangulaire ou circulaire — qu'aux transformateurs cuirassés, le circuit magnétique

(1) Employé par la Compagnie des Compteurs depuis 1914.

est séparé en deux parties identiques (fig. 7), sur lesquelles on enroule deux enroulements s' et s'' en série, ayant le même nombre de spires n , bobinés de façon que leurs forces magnétomotrices pour un courant i soient de signes contraires par rapport aux enroulements principaux.

» Si on désigne par $2\mathcal{R}'$ et $2\mathcal{R}''$ les réluctances des deux parties du circuit magnétique, φ' et φ'' les flux qui traversent ces circuits, les signes positifs étant ceux indiqués sur la figure 7, on a, pour le circuit électrique S_1, S_2 , la relation (voir fig. 7) :

$$(12) \quad 0 = r_i i + l_i \frac{di_i}{dt} + n_1 \frac{d\varphi'}{dt} - n_2 \frac{d\varphi''}{dt},$$

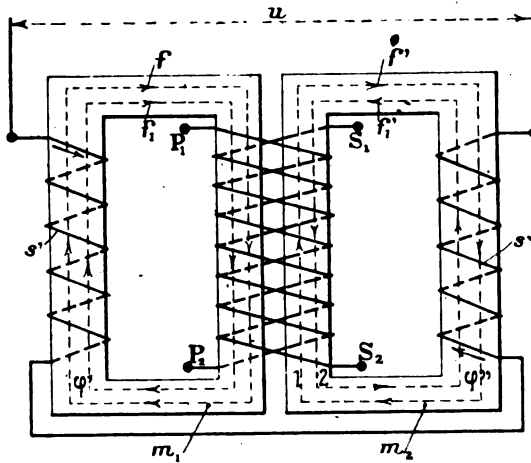


Fig. 7.

et pour le circuit de compoundage :

$$(13) \quad u = n \frac{d\varphi'}{dt} + n \frac{d\varphi''}{dt},$$

u étant la différence de potentiel aux bornes du circuit de compoundage, dont on néglige la chute ohmique et la dispersion magnétique ; les autres lettres ayant les mêmes significations que dans les paragraphes précédents.

» D'autre part, pour les circuits magnétiques, on a les relations :

$$(14) \quad \frac{2\mathcal{R}'\varphi'}{4\pi} = n i + n_1 i_1 + n_2 i_2,$$

et

$$(15) \quad \frac{2\mathcal{R}''\varphi''}{4\pi} = n i - (n_1 i_1 + n_2 i_2).$$

» En éliminant i , φ' et φ'' entre ces relations, on arrive à la formule

$$(16) \quad \frac{n_1 \mathcal{R}' - \mathcal{R}'}{n \mathcal{R}' + \mathcal{R}'} u = r_1 i_1 + \left[l_1 + \frac{8 \pi n_1^2}{\mathcal{R}' + \mathcal{R}'} \right] \frac{di_1}{dt} + \frac{8 \pi n_1 n_2}{\mathcal{R}' + \mathcal{R}'} \frac{di_2}{dt},$$

et en posant $\frac{\mathcal{R}' + \mathcal{R}'}{2} = \mathcal{R}$ on a :

$$(16') \quad \frac{n_1}{2n} \cdot \frac{\mathcal{R}' - \mathcal{R}'}{\mathcal{R}} u = r_1 i_1 + \left[l_1 + \frac{4 \pi n_1^2}{\mathcal{R}} \right] \frac{di_1}{dt} + \frac{4 \pi n_1 n_2}{\mathcal{R}} \frac{di_2}{dt}.$$

» Si on règle le courant i de façon à avoir dans le fer l'induction correspondant au maximum de perméabilité pour $I_1 = I_2 = 0$, on aura pratiquement $\mathcal{R}' = \mathcal{R}'$ pour toutes les valeurs de I_2 . En effet, les ampères-tours résultants dans les deux circuits magnétiques sont $n i + (n_1 i_1 + n_2 i_2)$ et $n i - (n_1 i_1 + n_2 i_2)$; ces ampères-tours sont en valeur efficace les résultantes des vecteurs $\overline{n I}$ et $\overline{(n_1 i_1 + n_2 i_2)}$ pour l'un des circuits et $\overline{n I}$ et $-\overline{(n_1 i_1 + n_2 i_2)}$ pour l'autre. Or, les vecteurs $\overline{(n_1 i_1 + n_2 i_2)}$ sont faibles devant $\overline{n I}$, de sorte que les ampères-tours qui agissent sur les deux circuits magnétiques diffèrent peu ; comme nous nous trouvons dans le voisinage d'un maximum pour la perméabilité, sa valeur et par conséquent aussi celle des réluctances $\mathcal{R}'$ et $\mathcal{R}'$ sont peu influencées par de faibles variations du champ magnétique.

» Pratiquement, dans les transformateurs bien étudiés, on peut prendre $\mathcal{R}' = \mathcal{R}'$ pour les valeurs de I_2 dans les limites de l'emploi du transformateur et la formule (16') prend la forme de la formule (3), avec cette différence que la réluctance $\mathcal{R}$ de la formule (16') est de beaucoup plus faible que celle qui intervient dans la formule (3) et de plus elle est pratiquement indépendante de I_2 . C'est de là que découlent les propriétés essentielles du transformateur compoundé.

» Dispositif B (fig. 3) ⁽¹⁾. Dans le dispositif A on est amené pratiquement à bobiner à la main les spires des enroulements de compoundage s' et s'' ; c'est pourquoi on n'emploie qu'un petit nombre de spires, aux bornes desquelles on ne peut avoir qu'une petite différence de potentiel.

» Comme la tension dont on dispose habituellement est de 100 à 150 volts, on est amené à employer un transformateur auxiliaire. Ce transformateur est très petit et ne consomme que 3 à

⁽¹⁾ Nous avons imaginé ce dispositif vers la fin de l'année 1920.

4 watts, mais on peut l'éviter en employant le dispositif B indiquée figure 8. Dans ce dispositif, l'enroulement de compoundage e est enroulé sur un circuit magnétique ouvert m , indépendant de celui du transformateur, qui lui sert comme armature.

» Le bobinage auxiliaire peut donc se faire au tour à bobiner, et on peut lui donner un nombre de spires en fil fin suffisant pour pouvoir l'alimenter directement à 110 volts (environ 1 500 spires) ou à une tension quelconque.

» Sur la figure 8, on a marqué en P_1 , P_2 , et S_1 , S_2 les circuits principaux, et on a tracé en f les trajets des lignes de force à un instant t .

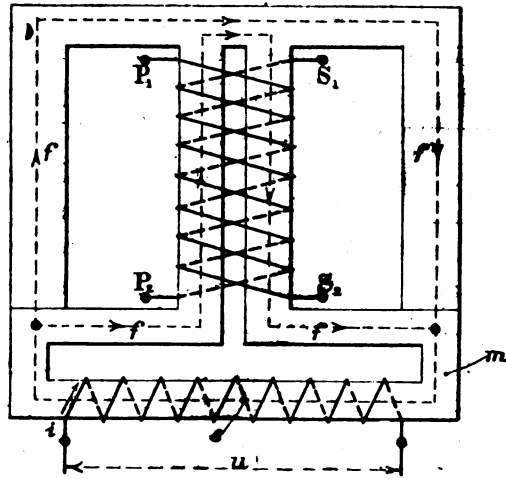


Fig. 8.

» On voit immédiatement que, en réglant convenablement la différence de potentiel u aux bornes du circuit e on peut amener le flux du transformateur à un état magnétique voulu (par exemple celui qui correspond au maximum de perméabilité) sans que le flux ainsi obtenu produise des courants induits dans les circuits principaux P_1 , P_2 , et S_1 , S_2 .

» En effet, par raison de symétrie le flux total à travers ces circuits, provenant de l'enroulement e , est nul (induction mutuelle nulle entre e et chacun des circuits P_1 , P_2 , et S_1 , S_2).

» On arrive donc aux mêmes résultats que dans le modèle A.

» La théorie du modèle B est plus compliquée que celle du modèle A ; nous nous proposons de la faire dans un autre travail. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Ilievici.

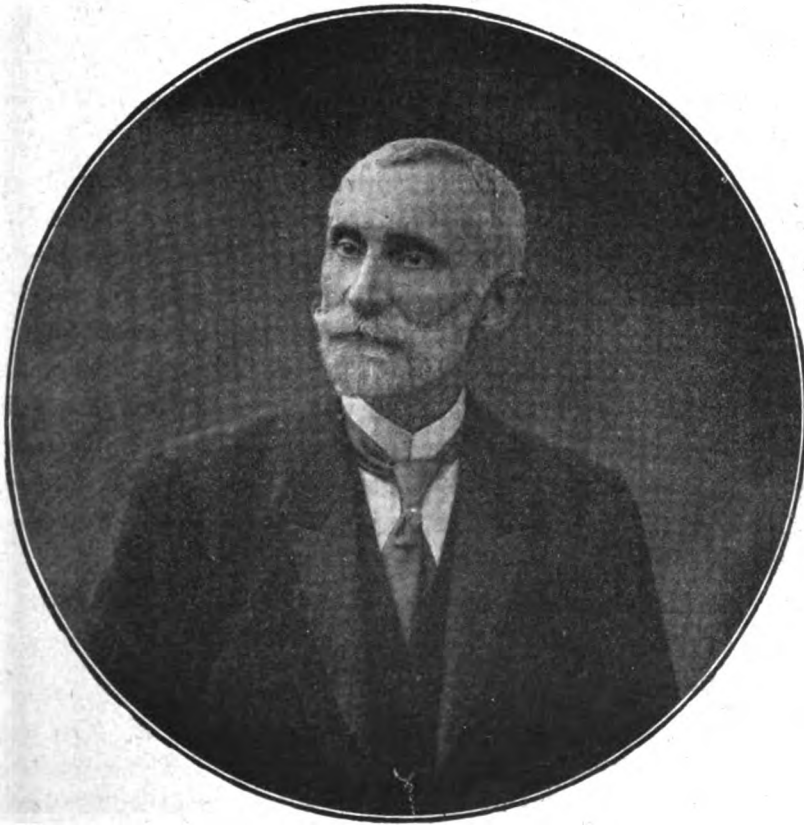
NÉCROLOGIE

ADRIEN BOCHET

**ANCIEN PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS,
DIRECTEUR DE L'ECOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES**

« MADAME, MESSIEURS, ⁽¹⁾

» C'est avec une profonde douleur que nous avons appris le malheur qui vous frappe. La Société française des Electriciens



conservera longtemps le souvenir de la longue et précieuse collaboration de M. Bochet.

» Dès 1889, au lendemain de la fondation de notre Société, M. Bochet commença à participer à nos travaux et à la vie active de notre groupement.

» Elu secrétaire en 1894, il apporta à nos réunions mensuelles,

⁽¹⁾ Discours prononcé par M. Marcel Brillouin aux obsèques, le 7 janvier 1923.

dans des conférences d'une élégante sobriété, le fruit de ses recherches industrielles sur les sujets les plus variés :

» Description des installations électriques de prolongement métropolitain de la ligne de Sceaux ;

» Calcul des conducteurs électriques ;

» Observations sur les précautions à prendre contre l'électrolyse dans l'établissement des voies de tramways ;

» Les parafoudres sur les canalisations électriques ;

» Les moteurs à explosion et à combustion ;

» Les projecteurs électriques militaires, etc...

» En 1909, nos collègues l'appellèrent à la présidence qu'il exerça de 1910 à 1911.

» A ce moment, le Laboratoire central d'Electricité était chargé de représenter notre pays à la Conférence internationale de Washington, où l'on devait fixer les valeurs des unités électriques du système pratique. Les relations du Laboratoire avec les services publics n'étaient encore réglées que d'une manière assez vague ; en raison du rôle international qui lui était attribué, il devenait nécessaire d'apporter à ces règles un peu de précision, sans nuire à l'indépendance qui caractérise l'organisation de ce Laboratoire. Dans les délicates négociations engagées à ce sujet, l'action personnelle de M. Bochet, sa finesse de jugement dans les affaires administratives eurent les plus heureux résultats.

» En quittant la présidence, M. Bochet eut la satisfaction de laisser à son successeur une situation nette ; ce fut une des années les plus brillantes et les plus fécondes de l'activité de notre Société.

» La collaboration de M. Bochet à tous les travaux de notre Société n'a heureusement pas cessé à la fin de sa présidence. Nos anciens présidents restent, d'après nos statuts, étroitement associés à la vie de notre Société ; mais rares sont ceux qui, malgré des fonctions aussi absorbantes que la direction d'une grande Ecole scientifique, restent toujours à l'œuvre, comme fit M. Bochet.

» C'était un de ces conseillers vigilants et expérimentés que nous étions assurés de trouver à nos réunions toutes les fois que devait être débattue quelque question délicate et importante. Il y a quelques mois à peine, sa présence et ses observations à l'une

des dernières séances de la commission administrative du Laboratoire central d'Electricité, ont été des plus utiles.

» L'Ecole supérieure d'Electricité ne lui doit pas moins que le Laboratoire. Depuis de nombreuses années, M. Bochet s'était chargé de plusieurs conférences industrielles, au grand avantage des élèves.

» A peine pouvez-vous deviner, par ce bref exposé, ce que fut la fécondité de cette étroite collaboration de plus de trente années à l'activité de la Société française des Electriciens sous toutes ses formes ; mais, vous la connaissez tous mieux que moi-même, et votre reconnaissance est assurée. Aucun de nous ne peut oublier la physionomie devenue presque ascétique de notre confrère, éclairée par un regard plein d'intelligence et de pensée, où l'on sentait la vie intense d'une âme dévouée au bien public.

» Veuillez accepter, Madame, notre respectueux hommage ; votre deuil est aussi le nôtre. »

Marcel BRILLOUIN,
Membre de l'Institut.

« MADAME, MESSIEURS, ⁽¹⁾

» Au nom de l'Ecole supérieure d'Electricité, dont il fut l'un des fondateurs et l'un des amis de la première heure, je viens adresser ici un dernier adieu et un dernier hommage à M. Adrien Bochet.

» Lorsque, en 1894, sous l'active impulsion de Mascart, la Société française des Electriciens décida la création, à côté du Laboratoire central d'Electricité, d'une Ecole où seraient étudiées les applications, déjà si nombreuses alors, de l'électricité, un petit groupe d'ingénieurs éminents entièrement acquis à ce projet dont ils comprenaient toute l'importance se groupèrent autour du savant pour en assurer la réalisation et le succès. M. Bochet fut l'un de ceux-là. Nul ne pouvait être mieux désigné que lui pour représenter l'esprit dans lequel, suivant la pensée des fondateurs, devait être dirigé l'enseignement de la nouvelle Ecole : alors en pleine activité industrielle, ingénieur chef du service des installations d'éclairage électrique à l'importante Maison Sautter-Harlé,

(1) Discours prononcé par M. Paul Janet aux obsèques, le 2 janvier 1923.

il devait apporter à des jeunes gens bien préparés à le comprendre tout le fruit d'une expérience personnelle déjà longue et d'une méthode industrielle impeccable. Appelé à prendre part à l'œuvre commune qui venait d'être entreprise, il se chargea avec le plus entier désintéressement et le dévouement le plus absolu de la partie de l'enseignement relative aux installations électriques. En un nombre restreint de leçons, savamment résumées, il sut donner, à ces élèves d'origines si variées qui composaient son auditoire, les indications les plus complètes et les plus précieuses sur les problèmes qu'ils devaient rencontrer à chaque pas dans leur carrière future. Plus tard, l'enseignement de M. Bochet se développa et s'étendit aux installations mécaniques des usines d'électricité. C'est là le titre des leçons qu'il professait à l'Ecole supérieure d'Electricité au moment où la guerre éclata ; ce devaient être les dernières ; absorbé par les lourdes charges de la Défense nationale, puis, après l'armistice, par la direction de cette grande Ecole à laquelle il était si profondément attaché, il ne put reprendre son enseignement à l'Ecole supérieure d'Electricité, mais il resta toujours très assidu et très fidèle à ses réunions du Conseil, où sa voix autorisée était très écoutée et ses avis souvent suivis. Il attachait la plus grande importance à l'étroite collaboration des deux Ecoles, et c'est bien souvent sur ses conseils que de jeunes ingénieurs des Arts et Manufactures sont venus chercher rue de Staël le complément des connaissances électriques qui leur était nécessaire.

» Au nom des nombreuses générations d'élèves qui suivirent son enseignement, au nom du personnel de l'Ecole supérieure d'Electricité, au nom de la Commission administrative et du Conseil de Perfectionnement, où il ne comptait que des amis, j'adresse à sa veuve, à ses enfants, à sa famille, mes plus profondes et plus respectueuses sympathies. »

Paul JANET,
Membre de l'Institut.

INFORMATIONS

Compte rendu du diner annuel de l'Institution of Electrical Engineers

Un de nos anciens présidents qui a pu assister, cette année, au diner annuel de l'Institution of Electrical Engineers, nous communique ce qui suit :

Le dernier diner annuel de l'Institution a eu lieu le 6 février 1922, à l'Hôtel Cecil. Les ingénieurs français, qui ont eu l'occasion d'être reçus par leurs collègues de Londres, connaissent le luxe de ces fêtes.

Le nouveau président de l'Institution est M. Frank Gill, de la Western Co, ingénieur téléphoniste bien connu.

Parmi les 480 convives présents se trouvaient un grand nombre de personnalités officielles, dont quelques-unes paraissent un peu inattendues pour nos habitudes françaises ; car, à côté de M. Neville Chamberlain, post master general, et de Sir Joynson Hicks, membre du Parlement, secrétaire pour le Commerce des Colonies, étaient assis Sir Antony Bowby, président de l'Académie Royale de Chirurgie, et le très Révérend Evêque Ryle, doyen de Westminster.

Après avoir porté les toasts de loyalisme à Leurs Majestés, le président lut un message du Prince de Galles qui s'excusait de n'avoir pu répondre à l'invitation de l'Institution en raison de ses multiples obligations, mais lui laissait quelque espoir pour l'avenir.

Le président donna ensuite connaissance des messages reçus de trois sociétés sœurs, en commençant par celui de notre Société.

Après lecture des messages de l'Associazione Elettrotecnica Italiana et de l'American Institute of Electrical Engineers, Sir Joynson Hicks porta le toast à l'Institution.

Il la félicita de son développement et reprit le thème que nous avons si souvent entendu développer chez nous depuis la guerre par les voix les plus autorisées : nécessité de l'union entre le laboratoire et l'usine ; il y avait toutefois cette légère variante que, en raison de la personnalité de l'orateur, l'usine était devenue le commerce d'exportation.

Il insista surtout sur les services que rendent au commerce britannique les étudiants d'outre-mer, accueillis dans les usines, les ateliers et les collèges de la Métropole, et il offrit, pour en augmenter le nombre, le concours de son gouvernement.

Il engagea ensuite chaudement l'Institution à poursuivre l'unification des spécifications techniques, et il ajouta, un peu oublié, semble-t-il, de l'existence du Comité électrotechnique international, que le monde pourrait ainsi se rendre compte de l'excellence des spécifications britanniques.

Le président Gill, dans sa réponse, rappela d'abord le nombre excessif des génératrices électriques en Angleterre ; il exprima le souhait qu'à l'instar des Etats-Unis la production d'énergie y fût concentrée dans quelques puissantes usines.

Passant ensuite à la question familière pour lui des communications téléphoniques internationales, il rappela que, depuis la réalisation des dernières découvertes, la difficulté des communications téléphoniques à grande distance n'est plus d'ordre technique, mais d'ordre commercial ; car il est impossible actuellement de donner à un gouvernement quelconque le contrôle sur l'exécution du contrat réglant l'exploitation. Il fit allusion à notre future Semaine des Postes, Télégraphes et Téléphones, qu'il salua comme un progrès important, estimant qu'il faudrait, non pas y élaborer des mesures de coordination ou un texte de code, mais y chercher à la fois une vue d'ensemble sur l'entreprise et les moyens de réaliser un contrôle unique.

A propos de la question des laboratoires, il exprima l'idée qu'elle est dominée par deux facteurs, l'argent et l'organisation, et que, par suite, seules les institutions puissantes peuvent mener à bien les recherches scientifiques.

Conduit tout naturellement par cette dernière considération à l'examen de la situation de l'Institution, il annonça que le nombre de ses membres atteint maintenant 10 600, en augmentation de 3 000 au cours des quatre dernières années, ce qui correspond à un taux annuel de 9 pour 100, amenant au doublement au bout de huit ans.

Douze branches régionales tiennent leurs réunions en dehors de Londres et elles comprennent 4 700 membres, soit 45 pour 100 du nombre total. Ce qui est peut-être plus intéressant encore, c'est le travail de ces sections régionales, travail que le président a qualifié de splendide.

M. Highfield, président sortant, qui prit une part active au congrès des ingénieurs franco-britanniques de 1913, porta enfin le toast aux hôtes de l'Institution.

Souhaitons que l'an prochain, un représentant de la Société française des Electriciens puisse se trouver là pour répondre à ce dernier toast, car il semble bien ressortir de ce résumé que notre Société aurait, pour accroître sa prospérité, plus d'un exemple à prendre à Londres.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Essais de durée du parafoudre à oxyde et à pellicule (1), par N.-A. Lougee (Amer. Inst. Elect. Eng., novembre 1920).

L'expérience a montré qu'en l'espace de cinq années de service dans des positions fort exposées, ce parafoudre n'a subi qu'une détérioration très minime. En outre, des essais de laboratoire intensifs ont été effectués au moyen de décharges artificielles quotidiennes. Divers types de parafoudres à oxyde ont été éprouvés ainsi et, d'une manière générale, aucune détérioration appréciable ne s'est produite pendant de longues périodes d'essai. Cela permet de tirer des conclusions pour un service normal moyen, mais il est évident qu'un coup de foudre direct ou une mise à la terre prolongée seraient susceptibles de causer la destruction d'un appareil. Les résultats obtenus avec les parafoudres en essai sont également examinés ; diverses sortes de circuits furent choisies et installées à titre d'expérience et quelques-uns des oscillogrammes recueillis sont reproduits dans le mémoire.

Le courant de court-circuit des génératrices et moteurs d'induction, par R.-E. Doherty et E.-T. Williamson (Amer. Inst. Elect. Eng., janvier 1921).

Divers auteurs ont pensé qu'un court-circuit brusque d'une génératrice d'induction ne causerait pas une élévation initiale de courant aussi grave que dans le cas d'une machine synchrone équivalente. Aussi a-t-on proposé l'emploi de machines de cette sorte, comme apportant une solution partielle au problème des courts-circuits dans les systèmes à courant alternatif. Or, à la suite d'une étude théorique et d'essais oscillographiques sur un moteur d'induction, les auteurs du présent mémoire ont montré que l'élévation initiale de courant, dans une machine d'induction, n'est limitée, tout comme dans une machine synchrone, que par la réactance de dispersion, bien que, finalement, le courant tombe à zéro, au lieu de se maintenir à une certaine valeur. Ils trouvent que le courant de court-circuit brusque d'une machine d'induction polyphasée (génératrice ou moteur) qui, au début, surpasse un grand nombre de fois le courant normal indiqué, est une composante d'un courant alternatif et d'un courant continu, de grandeurs à peu près égales dans le primaire et le secondaire.

L'inductance de dispersion étant supposée la même, le courant initial sera le même, que la machine soit court-circuitée comme une machine d'induction, ou qu'elle ait le secondaire excité avec du courant continu. La réactance de dispersion, dans les conditions de court-circuit, est plus faible que celle indiquée par les essais d'impédance ordinaires, et la durée réelle du courant transitoire est moindre que celle indiquée par la résistance ohmique et la réactance, dans l'essai d'impédance, cela provenant, d'une part, de ce que les courants de Foucault augmentent la résistance effective ; d'autre part, de ce que la saturation des trajets de dispersion diminue l'inductance (2).

Températures de sécurité pour les câbles sous papier basse tension, par W. A. Del Mar (Amer. Inst. Elect. Eng., février 1921).

L'action prolongée de températures voisines de 100° C est-elle susceptible de détériorer les câbles sous papier ? Telle est la question soulevée par l'auteur. Certains ingénieurs affirment que des températures supérieures à 85° C sont admissibles, mais l'auteur est d'avis que c'est là un point à examiner plus à fond avant de ne rien changer aux limites actuellement adoptées. Ce qu'il y a lieu d'élucider, notamment, c'est si la résistance mécanique du papier est affectée dangereusement par une exposition continue, pendant plusieurs semaines, à une température de 100° C. L'auteur décrit les essais de laboratoire par lui effectués dans cette voie, essais l'amenant à penser que la résistance à la traction et la résistance à l'arrachement sont fort réduites au cours d'un mois de ce régime de température. Aussi est-il opposé à toute modification des conditions établies par le Standards Committee.

(1) Pour la description de ce type de parafoudre, voir « Bulletin de la Société française des Electriciens », novembre 1919, n° 83, t. IX (3^e série), p. 574.

(2) Voir le résumé sur la Réactance des machines synchrones, Bulletin de la Société française des Electriciens, novembre 1919, n° 83, t. VIII (3^e série), p. 575.

BIBLIOGRAPHIE

Note sur le calcul tensoriel, par Assier de Pompignan, 1 brochure in-8. Paris. Librairie scientifique J. Hermann, 1923.

L'emploi des tenseurs se répand de plus en plus dans les calculs relatifs à la physique mathématique. Malheureusement, il existe encore peu d'ouvrages sur ce sujet dans la littérature française. En 32 pages, le capitaine de frégate Assier de Pompignan a cherché à exposer les bases et les principales formules relatives à cette nouvelle branche des mathématiques. L'ouvrage est peut-être un peu trop condensé. Néanmoins, il sera consulté avec fruit par tous ceux qui veulent pouvoir suivre de près les théories modernes de la physique.

L'évidence de la Théorie d'Einstein, par Paul Drumaux, professeur à l'Université de Gand, 1 brochure in-8°. Paris, Librairie scientifique J. Hermann, 1923.

L'auteur est certainement un de ceux qui savent le mieux vulgariser les théories modernes de la physique, et son nouvel ouvrage n'est pas inférieur à ceux qu'il a fait déjà paraître.

Dans cette brochure de 69 pages, il a cherché à nous faire voir que le simple bon sens justifiait la théorie de la relativité. Suivant sa propre expression, « la théorie d'Einstein est la guerre aux mots qui ne savent ce qu'ils veulent dire. »

Il ne cherche pas, du reste, à nous exposer complètement la théorie de la relativité. Il s'est proposé seulement de nous faire voir qu'un raisonnement rigoureux devait fatalement conduire aux conclusions d'Einstein, et que la théorie de ce dernier, loin d'être une exception ultra-savante, devait être facilement comprise par tous ceux qui savent penser et raisonner.

Electricité industrielle. Problèmes élémentaires avec schémas, à l'usage des écoles et cours d'enseignement technique, par F. Harang, professeur d'Electricité et de Technologie industrielle à l'Ecole municipale Dorian et à l'Ecole Edgar-Quinet (Paris), 1 vol. 24 cm × 13 cm, de VI-261 pages, avec 167 figures et tableaux. Paris, Dunod, 1921.

Nombreux — et parfois excellents — sont les traités élémentaires d'électricité industrielle à l'usage des élèves des écoles professionnelles, étudiants de toutes sortes, contremaîtres, etc., mais, en général, il n'y entre que peu ou pas d'applications numériques, cependant si nécessaires à l'illustration des sujets exposés. Or c'est précisément pour répondre à cette nécessité, que le présent ouvrage a été écrit, et l'on n'en saurait trop complimenter l'auteur.

Afin de faciliter le travail à toutes les catégories de lecteurs, et plus particulièrement à ceux qui étudient seuls, l'ouvrage donne au commencement de chacun des quatorze chapitres un résumé des principaux faits théoriques, des lois fondamentales et des formules qui les traduisent.

Les applications comportent deux catégories d'exercices : ceux qui sont résolus complètement, et ceux dont les énoncés sont simplement suivis des résultats. Il est à peine besoin de dire que les premiers seront particulièrement appréciés.

On ajoutera que la plupart des problèmes traités sont accompagnés du schéma de montage des appareils utilisés, et que ces schémas sont toujours parfaitement clairs et explicatifs.

Traité d'Electricité théorique, rédigé en vue des applications industrielles, à l'usage des futurs ingénieurs. Conforme aux programmes d'entrée à l'Ecole supérieure d'Electricité de Paris et de la licence ès-sciences, par Jacques Garvallo, Agrégé de l'Université, Répétiteur de Physique à l'Ecole Polytechnique, 1 vol. 25 cm × 16 cm, de XII-548 pages, avec 304 figures. Paris, Dunod, 1921.

Comme l'indique l'auteur dans sa préface, ce traité est la reproduction des leçons par lui professées pendant dix années consécutives à l'Ecole spéciale de Mécanique et d'Electricité, pour les candidats à l'Ecole supérieure d'Electricité à Paris. S'adressant à des jeunes gens sortant pour la plupart de la classe de mathématiques des lycées, ces leçons avaient pour but de les conduire en un an (tout au moins en matière d'électricité), au niveau des élèves sortant des grandes écoles et des facultés.

Ce but difficile, l'auteur ne pouvait l'attendre qu'en s'appuyant dès l'abord

sur des bases expérimentales solides, en graduant avec soin les difficultés de calcul, enfin en augmentant progressivement le bagage scientifique des futurs techniciens, et cela tout en tenant compte de la nécessité d'abréger des études théoriques trop longues et trop coûteuses... Or, il suffit de parcourir le remarquable traité de M. Carvalho, pour se convaincre de la haute efficacité de son enseignement et juger des succès brillants qu'il a pu obtenir.

Il convient d'ajouter que la présentation impeccable de l'ouvrage mérite tous les éloges.

Chimie Industrielle (la Grande Industrie chimique — les Métalloïdes et leurs composés — les Métaux et leurs sels — Industries organiques), par Paul Baud. Un volume 27 cm x 18 cm de 704 pages, avec 270 figures. Paris, Masson et Cie, 1922.

Depuis une trentaine d'années, la Science chimique appliquée aux Arts étend son domaine avec une telle rapidité que, seuls, le dépouillement des brevets et la lecture des revues spéciales peuvent donner aux Chimistes et aux Ingénieurs une documentation précise.

Il paraissait néanmoins tentant de réaliser pour le public préoccupé des progrès faits depuis 1914, et pour le grand Enseignement, un ouvrage complet, et cependant limité, qui fût une introduction, et un Manuel clair et concis de Chimie Industrielle.

C'est cet ouvrage que M. Baud présente aujourd'hui. L'auteur s'est basé sur les documents et les travaux les plus récents français et étrangers ; il a insisté sur les modes de préparation les plus employés, en évitant de donner à cet ouvrage l'aspect d'une liste de recettes adoptées par l'Industrie. Pour chaque sujet important, il a dressé une monographie (chimique et technique) rapide, complétée de documents économiques, qui fixeront pour le lecteur certains ordres de grandeur. C'est ainsi qu'il s'est préoccupé de faire connaître pour toutes les méthodes d'emploi courant et touchant à des produits de grande consommation, les rendements généralement admis par les industriels. Enfin, il indique les quelques brevets essentiels qui ont retenu l'attention des spécialistes, et dont les usines d'exploitation sont de fonctionnement récent.

S'il a jugé nécessaire de consacrer la première partie de ce livre à l'ensemble de fabrication qui constitue la grande industrie chimique, il a suivi, pour l'étude des métalloïdes et de leurs composés, l'ordre des valences croissantes, et dans la classification admise pour les métaux, le lecteur retrouvera, à très peu près, celle de J.-B. Dumas. Pour les industries organiques, le premier chapitre du livre IV énumère les procédés de préparation des carbures et de leurs dérivés dans la suite logique des principales fonctions.

Ce volume est abondamment illustrée de figures variées : photos, schémas, plans, dispositifs d'outillages, etc...

IL Y A TRENTE ANS

La mise à la terre dans les distributions électriques (M. R.-V. Picou). — Sur les conditions de couplage des alternateurs (suite), (M. A. Blondel).

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. KENRIOT - 50, RUE GEBERT, PARIS

AUG 1 1923

TOME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 23.

MARS 1923

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs. Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de:

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en France

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu
et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commuatrices.

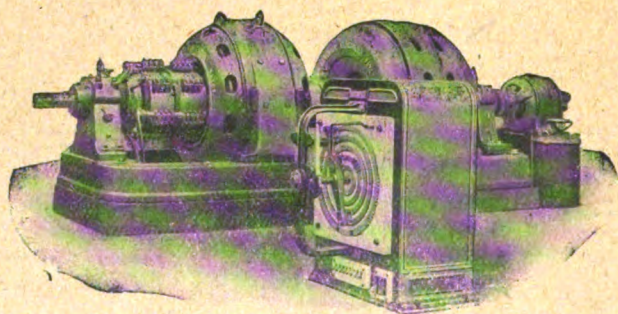
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital. 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 7 mars 1923 :
Admission de membres titulaires, p. 81. — Membres décédés, p. 82. — Electrification du Chemin de fer de Paris à Orléans (M. PARODI), p. 83.

INFORMATIONS, p. 163.

BIBLIOGRAPHIE, p. 167.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 168.

IL Y A TRENTE ANS, p. 168.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 7 mars 1923. ⁽¹⁾

Présidence de M. Marcel BRILLOUIN

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Decaux (Ernest-François), Elève à l'E. S. E., 11, rue de Chartres, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Dourgnon (Jean), Elève à l'E. S. E., 4, rue du Dôme, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Dellernas (Joseph-Eugène-Georges), Elève à l'E. S. E., 22, rue des Volontaires, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Favroy (Eugène-Auguste), Elève à l'E. S. E., 10, rue de Vaugirard, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Chevrie** (Maurice-Jean-Baptiste-Joseph), Ingénieur à la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, 33, avenue des Deux-Gares, à Antony (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Duché** (Frédéric-Jean), Directeur adjoint de la Société d'Eclairage des Véhicules sur Rail, 79, rue Saint-Lazare, à Paris (9°). — Présenté par MM. Saint-Martin et Bossu.
- Houillon** (Pierre-Marie), Elève à l'E. S. E., 21, boulevard Lefebvre, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Goussilaume** (Gustave-Antoine), Ingénieur à la Compagnie des Chemins de fer de l'Etat, 11, rue du Gros-Caillou, à Paris (7°). — Présenté par MM. P. Janet et Lebeaupin.
- Grelot** (Paul-Henri), 80, rue Saussure, à Paris (17°). — Présenté par MM. P. Janet et Lebeaupin.
- Japhet** (Henri-Benjamin-Eugène), 98, boulevard de Clichy, à Paris (18°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Martinoli** (Daniel), Officier mécanicien de la Marine, 11, rue Edme-Guillout, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et Lebeaupin.
- Pinat** (Adrien-Pierre), Elève à l'E. S. E., 140, rue de Paris, à Pantin (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Prud'homme** (Jean-Marcel), Etudiant, 34 bis, rue Molitor, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Gulgnard** (Maurice), Inspecteur au Service électrique de la Compagnie des Chemins de fer de l'Etat, 4, avenue Daubigny, à Paris (17°). — Présenté par MM. P. Janet et Lebeaupin.
- Rey** (Jacques), Elève à l'E. S. E., 28, rue de Ponthieu, à Paris (8°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Spire** (Robert), Licencié ès-Sciences physiques, attaché au laboratoire électro-technique de la Compagnie des Chemins de fer de l'Etat, 21 bis, rue Duhesme, à Paris (18°). — Présenté par MM. P. Janet et Lebeaupin.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *F. Maquaire* et *Romeyn*.

Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

ELECTRIFICATION PARTIELLE DE LA COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER D'ORLÉANS

L'auteur rappelle quelles sont les raisons générales qui ont poussé la Compagnie d'Orléans à électrifier une partie de son réseau et indique quelles considérations ont guidé le choix des lignes à équiper.

Une comparaison est faite entre les dépenses de la traction électrique et de la traction à vapeur et des précisions sont données sur le mode d'établissement du bilan économique de l'électrification.

Après avoir fait une comparaison sommaire entre les deux modes de traction, afin de mettre en évidence les avantages principaux du nouveau mode de traction, l'auteur décrit sommairement l'électrification en cours.

La Compagnie d'Orléans va électrifier en première étape 915 km de lignes, comprenant 1 625 km de voies principales, sans compter les voies de garage et de triage.

Ce sont les lignes de Paris à Brive, de Saint-Sulpice à Gannat et de Brive à Clermont.

L'énergie électrique sera produite dans l'usine génératrice thermique de Gennevilliers, et dans les usines génératrices hydrauliques d'Eguzon, de Coindre, de la Cellette et de Vernéjoux, les trois dernières faisant partie de la concession que le Gouvernement a accordée à la Compagnie d'Orléans dans le Massif central. L'énergie triphasée ainsi produite sera transmise par des lignes à 90 000 et 150 000 volts, dans une série de sous-stations de commutatrices écartées les unes des autres de 25 km en moyenne.

Le courant continu à 1 500 volts sera distribué le long des lignes électrifiées par des lignes de contact aériennes à suspension caténaire ; dans certaines parties à gros trafic, un troisième rail servant de feeder pourra être utilisé éventuellement comme conducteur de prise de courant de secours.

La Compagnie d'Orléans a commandé pour desservir ces lignes :

200 locomotives à marchandises pesant environ 60 tonnes, du type BB, d'une puissance pendant 1 heure d'environ 1 500 ch et continue de 1 200 ch ;

80 automotrices pesant environ 60 tonnes, d'une puissance pendant une heure de 950 ch et continue de 700 ch ;

5 locomotives d'essai à grande vitesse :

1 du type Gearless, de 2 100 ch de puissance continue ;

1 du type à bielles hyperstatiques, de 3 000 ch de puissance continue ;

1 du type à bielles isostatiques et à moteurs entièrement compensés, de 3 000 ch de puissance continue ;

1 du type à engrenages de 3 200 ch de puissance continue ;

1 du type à engrenages et à moteurs entièrement compensés et avec récupération, de 3 200 ch de puissance continue.

Les installations seront progressivement mises en service de 1924 à 1927.

PREMIERE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

M. PARODI. — « Nous ne développerons pas ici les origines du mouvement qui s'est produit en France, vers la fin de la guerre, en faveur d'une électrification étendue des réseaux des chemins de fer et nous nous bornerons à rappeler qu'il n'est qu'une des conséquences de notre effort vers une plus grande indépendance économique.

» Chaque année, nous devons importer, d'Angleterre ou d'Allemagne, une vingtaine de millions de tonnes de charbon, ce qui rend notre pays tributaire de l'étranger pour plus de 2 milliards de francs, aux cours actuels des combustibles et des changes.

» La mise en valeur de nos richesses hydrauliques, qui dépassent 9 millions de chevaux et dont seulement 20 pour 100 sont actuellement aménagés, nous permettra, par une substitution progressive de la houille blanche à la houille noire, de combler le déficit actuel et de répondre à l'accroissement normal de notre consommation.

» Un pareil programme correspondrait à l'aménagement rapide d'une puissance hydraulique de 1 à 2 millions de kilowatts et à la construction progressive d'usines hydroélectriques fournissant 50 000 à 100 000 kilowatts supplémentaires par an. Mais il ne suffit pas d'accroître la production d'énergie électrique ; il faut, parallèlement, développer la consommation et substituer l'électricité au charbon dans le plus grand nombre possible de ses applications, et ce n'est pas la partie la plus facile du problème.

» Il était donc naturel de pousser les réseaux de chemins de fer à l'électrification en leur concédant des chutes importantes, mais il ne faut pas oublier qu'à eux seuls ils ne peuvent prétendre à modifier la situation économique, car la consommation globale des chemins de fer (8,5 millions de tonnes en 1919), ne représente guère que 15 à 16 pour 100 du total de la demande de combustible en France, et moins de la moitié de notre déficit annuel. Une électrification partielle, comme celle actuellement en cours d'exécution, ne permettra de réduire ce déficit annuel que de deux ou trois millions de tonnes.

» Certaines agglomérations importantes consomment des quantités de combustible du même ordre. La région parisienne, par exemple, absorbe, à elle seule, environ 8,4 millions de tonnes ⁽¹⁾ de charbon par an, dépense sensiblement égale à celle de l'ensemble des chemins de fer français.

» Pour tous ces centres de consommation, l'emploi étendu de l'énergie électrique d'origine hydraulique pourrait réduire nos importations de charbon, tout en permettant aux distributeurs et aux usagers de réaliser d'importantes économies, si l'électricité était mise à leur disposition.

» Il apparaît donc que l'électrification des chemins de fer fran-

(1) 1,2 million de tonnes pour les secteurs électriques,
2,4 millions de tonnes pour le gaz de Paris et de la banlieue,
2,5 millions de tonnes pour la grosse et la petite industrie,
1,5 million de tonnes pour les foyers domestiques,
0,8 million de tonnes pour les établissements publics :

çais, considérée au point de vue national, ne doit pas être étudiée isolément et que le choix des lignes à électrifier doit être guidé, non seulement par des considérations particulières et locales, mais encore par une étude d'ensemble des transmissions d'énergie en France.

» C'est ce qui donne un caractère tout particulier au problème de l'électrification des chemins de fer en France (1) et nous devons nous préoccuper non seulement de la substitution de la traction électrique à la traction à vapeur sur un certain nombre de nos propres lignes de chemins de fer, mais encore de la création d'un vaste réseau de distribution d'énergie.

» Ce double but semble pouvoir être atteint par la force même des choses : les installations de chemins de fer s'étant développées de manière à suivre les courants naturels de trafic qui se produisent entre agglomérations importantes, le tracé des grandes lignes de transmission d'énergie coïncide presque nécessairement avec celui des lignes dont l'électrification est la plus intéressante au point de vue financier.

CHOIX DES LIGNES A ÉLECTRIFIER

» Dès 1910, la Compagnie de Paris à Orléans avait examiné, et indépendamment l'une de l'autre, d'une part, l'électrification de la ligne de Paris à Orléans, au moyen de centrales thermiques et, d'autre part, celle des lignes du Massif central au moyen d'usines hydrauliques.

» Mais cette étude n'avait pas été poussée à fond, en raison des craintes qu'inspirait alors l'électricité. Le prix de combustible pratiqué à cette époque ne rendait pas d'ailleurs bien attrayante l'opération financière que constitue l'électrification.

» L'étude des chutes du Massif central, reprise vers 1916, a été poussée activement avec le concours du Ministère des Travaux publics et un premier projet d'électrification partielle du réseau d'Orléans a été présenté en 1918. C'est ce projet qui a été résumé dans la plupart des documents officiels actuellement publiés. Il

(1) L'ensemble du réseau de chemins de fer français a un développement de 40 000 km de route et plus de 13 000 locomotives ayant une puissance globale de l'ordre de 13 millions de chevaux y assurent la remorque des trains. L'électrification totale du réseau permettrait de remplacer 9 millions de tonnes de charbon par 3 à 4 millions de kilowatts-heure. Elle absorberait, en tout temps, une puissance de l'ordre de 500 000 kilowatts et la puissance à installer dans des usines hydroélectriques et thermiques pour répondre à ces besoins serait de l'ordre de 800 000 à 1 000 000 de kilowatts.

comporte l'équipement électrique de la presque totalité des lignes voisines des chutes de la Haute-Dordogne.

» En 1919, une étude plus complète a été faite et le projet primitif a été complètement remanié dans le but de transformer une électrification partielle et locale en une entreprise plus vaste, d'envergure beaucoup plus grande, dont la réalisation aura des conséquences beaucoup plus importantes que la simple substitution de la traction électrique à la traction à vapeur sur quelques lignes de chemin de fer. Il permettra de constituer immédiatement une des artères les plus importantes de notre réseau national de transmission d'énergie, l'artère nord-sud reliant Paris au Massif central.

» L'électricité permettant de transmettre économiquement l'énergie à grande distance, l'électrification d'un réseau de chemin de fer n'est pas nécessairement localisée au voisinage des usines génératrices ; on doit, tout d'abord, rechercher quelles sont les lignes dont l'électrification est la plus intéressante en soi, quitte à examiner ensuite si l'éloignement des usines hydrauliques ou thermiques constitue ou non un obstacle insurmontable à leur équipement.

» Tant au point de vue de l'exploitation proprement dite du chemin de fer qu'au point de vue national, il paraît raisonnable de substituer d'abord la traction électrique à la traction à vapeur sur les lignes où la consommation de charbon est la plus grande par unité de longueur de ligne équipée.

» La carte ci-jointe (fig. 1), donne une représentation claire de cette « densité de consommation » ; chaque ligne est représentée par un rectangle dont la surface est proportionnelle à la consommation annuelle de combustible, la hauteur étant ainsi proportionnelle à la dépense moyenne de charbon par kilomètre. Il apparaît immédiatement que la grande ligne Paris-Toulouse est celle qui, à longueur de ligne équipée égale, procurera l'économie de charbon la plus grande ⁽¹⁾.

» Les lignes de montagne ne sont pas nécessairement les plus

⁽¹⁾ A titre de comparaison, on a tracé à la même échelle deux cercles représentant : le plus grand, la consommation de charbon dans la région parisienne pour les besoins autres que les chemins de fer ; le plus petit, la consommation de combustible des seules usines d'électricité de Paris et de la banlieue.

intéressantes au point de vue de l'électrification et la difficulté du profil n'est qu'un des éléments du problème.

» Il est clair que la densité de consommation de charbon ne donne qu'une indication ; pour avoir une vision nette et complète des choses, il faudrait pouvoir comparer les dépenses d'exploitation de la traction électrique et de la traction à vapeur en fonction du profil et du trafic ; les éléments statistiques manquent

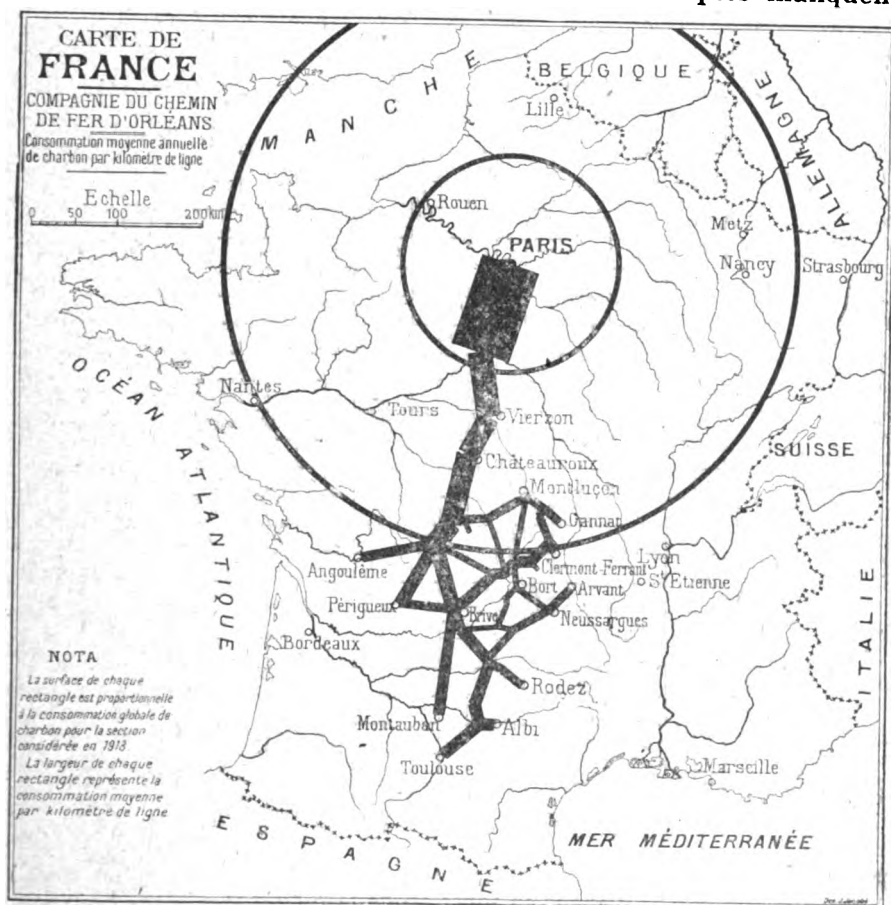


Fig. 1. — Carte du projet d'électrification du réseau de la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans

encore à ce sujet, aussi bien pour la traction électrique que pour la traction à vapeur, et tout ce que l'on peut dire à ce sujet est assez vague.

» Nous allons cependant indiquer ici sommairement quelle est l'allure générale des variations des dépenses d'exploitation par tonne utile remorquée en fonction de la pente fondamentale et du trafic.

PRIX DE REVIENT DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE ET DE LA TRACTION A VAPEUR

» Il résulte des travaux de Baum, Ricour, Amyot, Picard, que les dépenses totales d'exploitation d'une ligne pouvaient être considérées comme une fonction linéaire de la recette et par suite

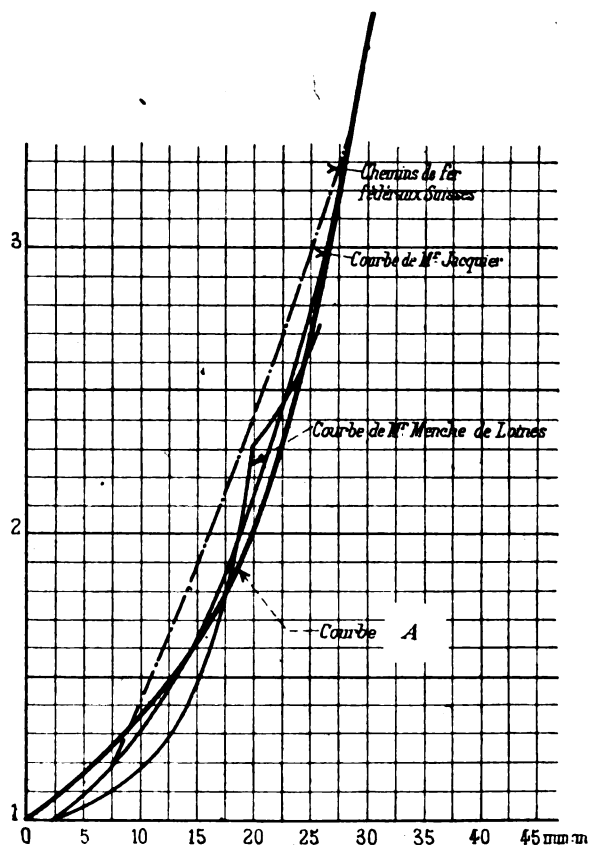


Fig. 2. — Diagramme des variations du prix de revient de la traction à vapeur en fonction de la rampe

du trafic ; la dépense moyenne totale pour une ligne serait ainsi représentée par la formule

$$D = a + b T$$

dans laquelle T représente le trafic, par exemple en tonnes-kilomètres remorquées par kilomètre.

» D'autres auteurs, tels que Baum, Noblemaire, Menche-De-

loisnes, Jacquier, etc..., ont étudié les variations des dépenses d'exploitation avec la pente fondamentale.

» Les courbes, tracées sur la figure 2, représentent par unité de trafic, en fonction de la pente fondamentale, le rapport des dépenses d'exploitation d sur une ligne de pente fondamentale i , aux dépenses correspondantes pour un kilomètre de ligne pratiquement en palier (ligne pour laquelle la pente fondamentale ne dépasse pas 2,5 millimètres par mètre).

» Ces courbes ont été déduites des statistiques d'avant-guerre des réseaux français.

» Elles diffèrent assez peu l'une de l'autre et elles ont toutes une allure hyperbolique : elles peuvent être représentées par des équations de la forme :

$$d = 1 + \frac{\lambda i - \gamma}{\mu - i}.$$

» Nous y avons fait figurer également une courbe relative aux chemins de fer suisse extraite d'une note publiée dans la revue « Schweizerische Bauzeitung ».

» L'hyperbole $d = \frac{68,8 (1 + 0,03 i)}{55 - i}$ représentée en A sur la figure 2

est très voisine des courbes empiriques françaises.

» Il semble donc que les dépenses d'exploitation par unité de trafic et par kilomètre sur une ligne quelconque pourraient être représentées, en fonction du trafic et de la pente, par une expression de la forme :

$$\left(b + \frac{a}{T}\right) \left(1 + \frac{\lambda i - \gamma}{\mu - i}\right).$$

» Une formule analogue semblerait pouvoir représenter les dépenses dans le cas d'une exploitation électrique, en y comprenant bien entendu les charges du capital afférentes à l'électrification. Dans ces conditions, pour un faible trafic, les dépenses dans le cas de l'électricité seront nécessairement plus grandes que pour la vapeur et le point E de la figure sera forcément placé au-dessus du point V.

» Il y a lieu de remarquer, et ce point est capital, que les pentes limites pour lesquelles les dépenses d'exploitation deviennent

prohibitives sont très différentes pour la traction à vapeur et pour la traction électrique ; la pente limite est de l'ordre de 40 à 60 mm : m pour la traction à vapeur, et elle est de l'ordre de 120 à 140 mm : m pour traction électrique.

» Avec la traction électrique, il est possible de constituer des trains ne comprenant que des automotrices à adhérence totale ; tel est le cas de la ligne du Fayet à Chamonix avec pente de 60 mm : m, des tramways de Boulogne, de Laon, etc... pour lesquels la pente fondamentale atteint 115 et même 120 mm : m.

» Il apparaît donc que, si on figure, comme on l'a fait sur le graphique (fig. 3), les surfaces représentant les dépenses d'explo-

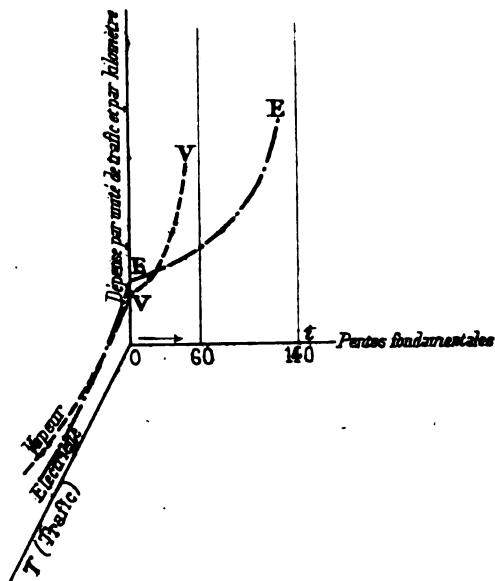


Fig. 3. — Courbes représentatives des dépenses d'exploitation par kilomètre en fonction des recettes et des pentes moyennes

tation en fonction de la pente et du trafic, par leurs traces sur les plans de coordonnées $i = 0$ et $T = 0$, pour une certaine valeur du trafic et pour une certaine valeur de la pente fondamentale, la traction électrique est nécessairement moins coûteuse que la traction à vapeur.

» L'emploi de la récupération qui permet, en ce qui concerne les vitesses et la consommation de combustible, de réduire l'importance des déclivités, doit contribuer à rendre moins rapide la croissance des dépenses d'exploitation électrique avec la pente fondamentale.

» Il est possible, en généralisant la méthode des longueurs vir-

tuelles en usage sur les chemins de fer de l'Etat italien et celle des tonnages fictifs employés par les chemins de fer américains, de définir la longueur virtuelle d'une ligne en fonction de son profil en la rapportant au poids utile remorqué et d'en déduire les lois approximatives de variation des dépenses de traction en fonction de la pente fondamentale et du trafic.

» L'exposé de cette théorie sortirait entièrement des cadres de la présente note. Nous nous bornerons à indiquer ici que, pour la traction par adhérence simple, si on veut se rendre compte du rendement d'une machine électrique ou à vapeur en tant « qu'organe de traction », il faut faire apparaître dès l'origine, dans la définition du travail utile de traction exprimé en tonnes-kilomètre virtuelles remorquées, le facteur d'adhérence (rapport du poids adhérent au poids total du train). Pour une ligne donnée et un train donné, la charge virtuelle par kilomètre est différente suivant que la traction est effectuée par locomotive unique ou par automotrices réparties tout le long du train. Il est également différent suivant que l'on emploie ou non la récupération. Cette théorie, qui permet de faire une comparaison rationnelle entre systèmes à traction simple ou multiple, met en évidence l'influence capitale des pentes limites :

» 6 pour 100 dans la traction à vapeur,

» 14 pour 100 — électrique.

» On retrouve alors, sous une forme différente, les résultats qui ont été indiqués sommairement plus haut en partant de renseignements statistiques étudiés par différents ingénieurs.

» Ces résultats, si incomplets soient-ils et dont nous ne faisons qu'esquisser la démonstration, sont suffisants pour faire comprendre comment, pour les lignes à forte déclivité comme pour les lignes à gros trafic, il existe un trafic limite ou une pente limite à partir desquels l'exploitation électrique est plus économique que celle assurée par la vapeur.

BILAN D'ÉLECTRIFICATION

» Faute de pouvoir faire un calcul exact et complet, nous allons essayer d'établir le bilan de l'électrification en faisant des hypothèses simplificatrices.

» Nous essaierons de nous rendre compte des conséquences financières de l'électrification en mettant en balance :

» *Pour la traction à vapeur :*

» a) Les frais d'achat de combustible,

» b) L'économie moyenne réalisée dans les dépôts et ateliers sur la conduite, l'entretien et la réparation des tracteurs.

» *Pour la traction électrique :*

» a) Les charges annuelles d'intérêt et d'amortissement, les dépenses d'installation du matériel fixe (lignes de transmission d'énergie, postes de transformation, sous-stations, lignes de contact, etc...)

» b) Les dépenses d'énergie électrique correspondant à un service de traction identique à celui réalisé avec la traction à vapeur.

» c) Les frais de conduite et d'entretien des sous-stations, les dépenses d'entretien et de réparation des lignes de contact.

» Nous ne ferons pas état des dépenses d'achat du matériel roulant, non pas seulement pour simplifier la comparaison, mais parce que l'expérience acquise dans les électrifications déjà réalisées montre que les dépenses afférentes à la constitution d'un parc de tracteurs électriques sont, en général, peu différentes de celles correspondant à l'achat des locomotives à vapeur susceptibles d'assurer le même service ; nous reviendrons sur ce point plus en détail un peu plus loin

» Si donc on appelle Q , la consommation de combustible exprimée en tonnes par kilomètre de ligne et C , le prix de la tonne de charbon rendue sur tender, les charges d'achat de combustible seront, par kilomètre de ligne, $Q \times C$. (a)

» L'économie moyenne réalisée dans les dépôts et ateliers sur l'entretien et la réparation des machines ne peut être évaluée qu'empiriquement en comparant les résultats obtenus à ce sujet dans les dépôts à vapeur et dans les dépôts électriques existants.

» Dans le cas particulier de la Compagnie de Paris à Orléans, le rapprochement des résultats d'exploitation de la ligne à traction électrique de Paris à Juvisy et de la ligne à traction à vapeur de Luxembourg à Sceaux et Limours, fait ressortir une économie par train-kilomètre, de l'ordre de 1 franc dans les conditions actuelles, et de 0,30 fr dans les conditions de service d'avant-guerre.

» En faisant l'hypothèse que ces économies varient linéairement avec le cours du charbon, nous pourrions représenter l'économie réalisée par train-kilomètre, en francs, par l'expression

$$0,10 + 0,009 C$$

» Cette représentation est évidemment discutable, mais étant donné qu'elle ne sera utilisée que pour de faibles variations du cours du charbon, autour de 100 fr, les erreurs que nous pourrions commettre n'auront pas très grande influence sur le résultat.

» Pour les lignes à fortes déclivités, où les locomotives à vapeur travaillent dans des conditions souvent difficiles, il faudra admettre un pourcentage de majoration qui pourra être pris égale à 25 pour 100 pour des déclivités de l'ordre de 15 mm : m, comme le prouvent les résultats d'exploitation des chemins de fer de l'Etat italien pour des lignes de montagne. L'économie réalisée par train-kilomètre se mettrait ainsi sous la forme :

$$(0,10 + 0,009 C) (1 + \varepsilon). \quad (b)$$

» Comme, d'ailleurs, le nombre de trains-kilomètres est approximativement égal à

$$\frac{1\,000 Q}{28},$$

en admettant que la dépense de charbon par locomotive-kilomètre soit de l'ordre de 28 kg, on voit que l'économie réalisée par kilomètre de ligne électrifiée sera

$$\frac{1\,000 Q}{28} (0,10 + 0,009 C) \times (1 + \varepsilon).$$

» Pour la traction électrique, en appelant :

» P , le capital engagé par kilomètre de ligne pour l'installation du matériel fixe ;

» r , le taux d'intérêt et d'amortissement majoré de 1 pour 100 pour tenir compte des dépenses d'entretien et de réparation du matériel fixe ainsi que de la conduite des sous-stations ;

» les charges annuelles d'intérêt et d'amortissement du matériel fixe, lignes de contact, sous-stations, etc... sont :

$$\frac{Pr}{100}. \quad (a')$$

» La quantité d'énergie électrique consommée pour réaliser un service de traction identique à celui réalisé avec la traction à vapeur sera, d'autre part, par kilomètre :

$$\frac{1\,000 Q}{\lambda},$$

en appelant λ le nombre de kilogrammes de charbon qui peuvent

être remplacés par 1 kilowatt-heure aux bornes des sous-stations. La valeur du coefficient λ dépend du rendement de la traction à vapeur et des conditions de service de la ligne ; elle semble être comprise entre 2,5 kg et 3,5 kg d'après les essais qui ont été faits aux Etats-Unis et en France. Pour des trains de banlieue, nous avons trouvé une valeur plus voisine de 4 que de 3,5.

» Enfin, en appelant p , le prix de l'énergie à l'entrée des sous-stations, la dépense correspondante de courant serait

$$\frac{1\,000\,Qp}{\lambda}$$

Pour que la substitution de l'électricité à la vapeur soit justifiée, il faut que les économies réalisées sur la traction à vapeur soient supérieures aux dépenses supplémentaires afférentes à la traction électrique. Le trafic minimum correspondant à l'égalité entre ces dépenses sera donc défini par l'équation suivante :

$$QC + \frac{1\,000}{28} Q(0,10 + 0,009\,C) \times (1 + \varepsilon) = \frac{1\,000\,Qp}{\lambda} + \frac{Pr}{100}$$

dans laquelle nous avons négligé pour simplifier les frais de conduite des sous-stations ainsi que les dépenses d'entretien du matériel électrique fixe.

Les résultats obtenus en tenant compte de ces dépenses, seraient peu différents de ceux indiqués ci-après.

$$Q = \frac{\frac{Pr}{100}}{C[1 + 0,32(1 + \varepsilon)] + 3,57(1 + \varepsilon) - \frac{1\,000p}{\lambda}}$$

ou, pour des lignes plates, avec $1 + \varepsilon = 1$.

$$Q = \frac{\frac{Pr}{100}}{1,32\,C + 3,57 - \frac{1\,000p}{\lambda}}$$

» En prenant pour les lignes plates :

Pour λ la valeur 3 ;

— p — 0,10 ;

— r — 8,5 pour 100

et pour les lignes de montagnes,

Pour λ la valeur 3,3 ;

— p — 0,09 ;

— r — 8,5 pour 100 ;

— ε — 25 pour 100 ;

on obtient les valeurs relatives de Q et de C indiquées dans le

tableau ci-dessous, en admettant que les dépenses d'installation par kilomètre de ligne sont de :

800 000 fr pour les lignes à voie quadruple,
 650 000 fr — triple,
 470 000 fr — double,
 250 000 fr — simple.

CONSOMMATIONS LINÉAIRES LIMITES Q DE CHARBON
 PAR KILOMÈTRE DE LIGNE (fig. 4)

LIGNES PLATES					LIGNES DE MONTAGNES	
$1 + \varepsilon = 1 \quad \lambda = 3 \quad r = 8,5 \quad p = 0,10 \text{ fr}$					$1 + \varepsilon = 1,25 \quad \lambda = 3,3 \quad r = 8,5 \quad p = 0,09$	
Voie	quadruple	triple	double	simple	double	simple
Prix du charbon C	$Q = \frac{51\ 500}{C - 22,6}$	$Q = \frac{41\ 800}{C - 22,6}$	$Q = \frac{30\ 200}{C - 22,6}$	$Q = \frac{16\ 100}{C - 22,6}$	$Q = \frac{28\ 500}{C - 16,3}$	$Q = \frac{15\ 150}{C - 16,3}$
120	530	430	310	165	275	146
110	590	480	348	184	304	162
100	665	540	390	208	340	181
90	765	620	448	239	380	206
80	900	730	527	281	448	238
70	1 085	880	638	340	530	282
60	1 380	1 120	808	430	652	347
50	1 880	1 525	1 109	588	846	450

» Ces chiffres ne sont donnés qu'à titre de simple indication, car des formules telles que celles qui viennent d'être rappelées, ne peuvent prétendre à représenter les faits dans toute leur généralité.

» Tout ce que l'on peut tirer de considérations aussi simplistes, c'est l'ordre de grandeur du trafic défini par la consommation de charbon qui doit être réalisée pour que l'opération soit « payante ».

» Pour une ligne plate, comme celle de Paris à Brive, qui a une consommation actuelle d'environ 700 t de charbon par kilomètre et qui rentre dans la catégorie des voies triples, on voit que l'électrification est largement justifiée au cours actuel du combustible ; mais, si on remarque que, sur une pareille ligne, l'accroissement du trafic se produisait avant-guerre au taux de 3,5 pour 100, par an, il apparaît que, lorsque l'électrification sera complètement réalisée et lorsque le matériel des sous-stations sera pleinement utilisé, l'électrification sera encore « payante » pour des prix de combustible de l'ordre d'une soixantaine de francs.

» Pour des lignes de montagne à voie simple, telles que celles

de Brive à Clermont et de Saint-Sulpice à Gannat, qui consomment respectivement 240 et 200 t de combustible par kilomètre, on voit que la substitution de l'électricité à la vapeur sera également justifiée, même avec le trafic actuel ; mais d'autres considérations militent en faveur de cette transformation sur ces lignes à voie unique et à profil difficile, l'électrification devant permet-

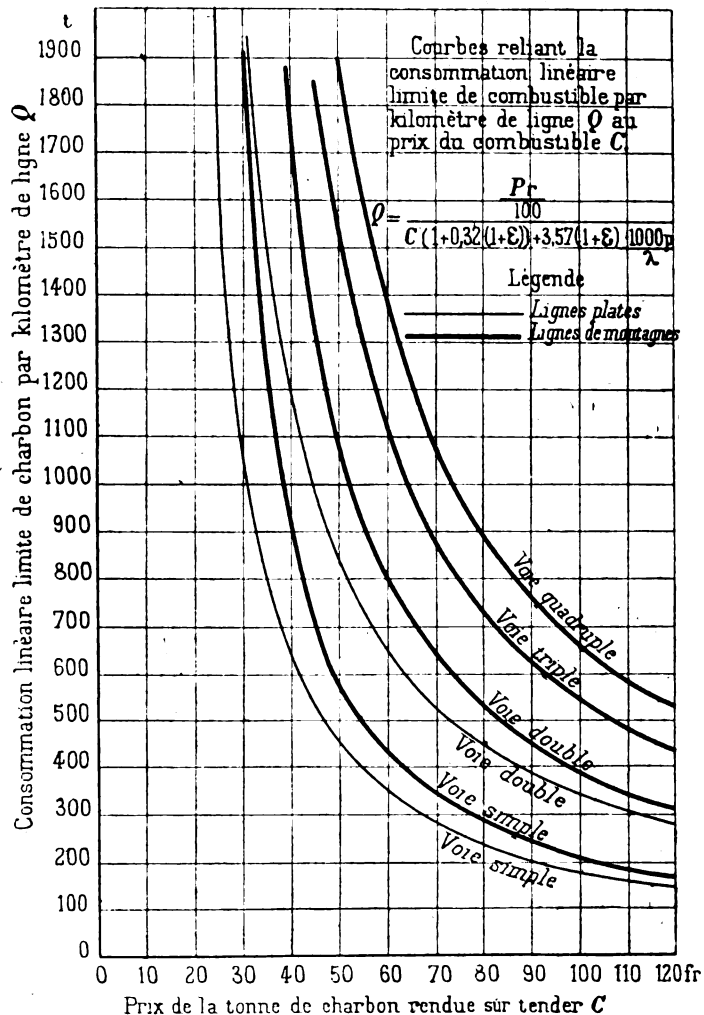


Fig. 4. — Courbes reliant la consommation linéaire limitée de combustible par kilomètre de ligne Q au prix du combustible C

tre une notable amélioration du service et un accroissement considérable de la capacité de débit. Afin de mettre en évidence le bénéfice que l'on pourra tirer de l'électrification sur les diverses lignes de chemin de fer pour lesquelles on compte la réaliser, nous allons faire une comparaison rapide de la traction électrique et

de la traction à vapeur, avant de passer à la description générale des installations en cours d'exécution à la Compagnie du Chemin de fer de Paris à Orléans.

UTILISATION DU MATÉRIEL ROULANT

» Dans les calculs qui précèdent, nous avons fait entièrement abstraction des dépenses d'achat de matériel roulant en admettant, par comparaison avec ce qui a été obtenu dans toutes les électrifications déjà réalisées, que les dépenses d'acquisition d'un parc de tracteurs étaient, à service égal, très sensiblement les mêmes pour la traction à vapeur et la traction électrique.

» Cette affirmation peut sembler discutable a priori, mais si on tient compte de ce fait que la « capacité de service » des locomotives électriques est beaucoup plus grande que celle des locomotives à vapeur, on arrive à justifier complètement cette hypothèse.

» L'expérience que nous avons acquise dans l'exploitation électrique de la ligne de Paris à Juvisy démontre que, dans un cas particulièrement défavorable, comme celui d'un service de banlieue, le parcours moyen annuel des tracteurs électriques était de 58 000 km en 1913 (52 000 km pour les locomotives, 70 000 km pour les automobiles), tandis que, la même année, le parcours moyen des machines à vapeur était, sur le réseau d'Orléans, de 37 000 km (43 000 km pour les machines de voyageurs, 28 000 km pour les machines de marchandises). En 1920, le parcours moyen annuel des locomotives à vapeur était de 22 667 km, alors que le parcours correspondant des locomotives électriques était de 43 000 km ⁽¹⁾.

» On peut espérer d'ailleurs obtenir des résultats encore plus favorables, lorsque les tracteurs électriques seront employés, comme nous comptons le faire, sur de très longs parcours. Les

(1) En 1919, le parcours moyen annuel des locomotives et automotrices était celui indiqué dans le tableau ci-dessous:

Réseaux	Nombre de locomotives	Nombre de locomotives par kilomètre de route	Parcours moyen annuel des locomotives en kilomètres
Est	1 958	0.39	25 000
Etat	3 304	0.30	23 000
Midi	1 664	0.26	17 000
Nord	2 253	0.65	24 000
P. L. M.	3 978	0.25	20 500
P. O.	2 162	0.28	27 300

locomotives électriques commandées par la Compagnie d'Orléans, seront susceptibles de remorquer normalement un train de bout en bout des sections électrifiées, en changeant au besoin d'équipe en cours de route.

» Une étude détaillée des roulements des machines électriques devant assurer, sur les lignes comprises dans la première étape d'électrification du réseau de la Compagnie d'Orléans, le même service que les locomotives à vapeur permet d'établir la comparaison suivante :

Désignation de la ligne	Nombre de locomotives nécessaires pour assurer le service des trains de voyageurs et de marchandises	
	Actuellement	Nouveau régime
Paris — Brive	540 locomotives à vapeur	261 locomotives électriq.
St-Sulpice — Gannat	13 — électriq.	80 automotrices
Brive — Clermont	7 automotrices	

» Si on admet que trois automotrices sont équivalentes, au point de vue des roulements, à une locomotive électrique, et qu'une des locomotives électriques actuellement en service effectue un parcours moyen double d'une locomotive à vapeur, on voit que les tracteurs se comportent, au point de vue de l'effectif, de la manière suivante :

traction à vapeur :

$$540 + \left(13 + \frac{7}{3}\right) \times 2 = 571.$$

traction électrique :

$$261 + \frac{80}{3} = 288.$$

» On voit donc que, pour l'ensemble des lignes considérées, un tracteur électrique remplacera au moins deux locomotives à vapeur.

PUISSANCE DES MACHINES CONSTITUANT LE PARC

» Si on admet que la puissance soutenue que peut développer une machine à vapeur peut être représentée en chevaux par l'expression $400 G$, où G représente la surface de grille de la machine en mètres carrés, on constate que, pour l'ensemble du parc de locomotives assurant actuellement le service de la section de Paris à Limoges, la puissance globale serait

$$1\,095 \times 400 = 430\,000 \text{ chevaux,}$$

la somme des surfaces de grille des différentes machines atteignant 1 095 m².

» Si, d'autre part, on totalise les puissances unihoraires des différents tracteurs électriques, automotrices et locomotives, prévus pour assurer le même service, on arrive à un total de 410 000 ch, chiffre tout à fait voisin du précédent.

POIDS ADHÉRENT DU PARC

» Si on compare, pour la même section de Paris à Limoges, les poids totaux des machines à vapeur constituant les parcs équivalents, on constate que l'on obtient les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Genre du service	Parc de tracteurs à vapeur		Parc de tracteurs électriques	
	Poids total Tonnes	Poids adhérent Tonnes	Poids total Tonnes	Poids adhérent Tonnes
Marchandises	16 100	8 825	—	—
Voyageurs	24 582	10 931	—	—
	40 682	19 756	19 516	17 856

» Nous voyons donc qu'à service égal, la somme des poids adhérents des machines constituant les deux parcs de tracteurs à vapeur ou électriques est sensiblement la même dans les deux cas.

» Nous avons observé une coïncidence analogue dans celles des installations américaines pour lesquelles nous avons pu obtenir des renseignements complets sur l'exploitation, avant et après électrification.

» En résumé, nous voyons qu'à service égal les parcs de locomotives à vapeur et de locomotives électriques ont sensiblement le même poids adhérent et la même puissance nominale.

» Mais il y a tout lieu d'espérer que l'on pourra obtenir des machines électriques une utilisation meilleure que celle qui a servi de base aux calculs précédents et que l'hypothèse faite sur le rapport de prix des parcs sera plus que justifiée.

» C'est ainsi que les trains de voyageurs ou de marchandises du Chicago-Milwaukee-St-Paul, sont remorqués sans relais, par une même locomotive, d'Harlowton à Avery, sur une distance de 800 km, alors qu'au début de l'exploitation électrique, la longueur de marche prévue sans relais pour les locomotives électriques était seulement de 400 km.

COMPARAISON SOMMAIRE DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE
ET DE LA TRACTION A VAPEUR

» La traction électrique possède certaines propriétés caractéristiques qui lui assurent, à certains points de vue, une supériorité indiscutable sur la traction à vapeur. Cette supériorité résulte naturellement de ce fait que la locomotive électrique n'est qu'un transformateur d'énergie alors que la locomotive à vapeur est à la fois un générateur et un transformateur d'énergie.

» Le tracteur électrique n'est utilisable qu'autant qu'une série complexe d'installations génératrices transformatrices et distributrices est en marche normale; la locomotive à vapeur, qui constitue un ensemble complet, peut se suffire à elle-même et fonctionner tant qu'elle peut être alimentée en eau et en charbon.

» Nous allons examiner rapidement comment se comparent, au triple point de vue de la « traction », de l'« exploitation » et de la « voie », les deux modes de traction en essayant de dégager, en cours d'étude, les principes fondamentaux qui doivent être obtenus dans l'examen d'une électrification étendue.

» En ce qui concerne la traction proprement dite, les machines électriques permettent de réaliser un meilleur service que les locomotives à vapeur en raison de leur puissance, de leur capacité de travail, de leur possibilité d'utilisation, de leur robustesse, de leur simplicité, de leur rendement.

» La puissance mécanique que peut fournir une locomotive à vapeur est limitée par les dimensions que l'on peut donner aux grilles du foyer et par le poids sur les essieux moteurs ou poids adhérent.

» En France, depuis l'introduction des foyers débordants, on construit des locomotives ayant 4 à 5 m² de surface de grille, ce qui fixe la puissance soutenue maximum de ces machines à environ 2 000 chevaux. Aux États-Unis, on a construit des machines de 6 à 8 m² (machine Mallet à foyer double) et on a pu porter ainsi la puissance à 3 000 ou 3 600 chevaux environ. Mais c'est là une limite extrême qui ne paraît pas susceptible actuellement d'être dépassée.

» Avec des machines à châssis et mécanisme unique, il ne paraît pas possible d'accoupler entre eux plus de cinq essieux moteurs, ce qui limite en France le poids adhérent à 90 t du fait de la limitation de la charge par essieu à 18 t. En employant des machines articulées (machines Mallet) à double mécanisme ou des « boos-

ters » de roues porteuses ou de tender, on peut augmenter le poids adhérent. C'est la tendance générale actuelle en Amérique pour assurer la remorque des trains de plus en plus lourds : de 2 000 à 6 000 t en service courant, 10 000 à 12 000 t pour certains transports de matières pondéreuses (trains de charbon du Virginian Railway, par exemple).

» Avec la traction électrique, il n'existe pas de limitation de ce genre ; grâce à la divisibilité de la puissance motrice, il est possible de rendre moteurs un nombre quelconque d'essieux d'un train, même tous si on le désire. Alors qu'avec le tracteur à vapeur, la machine articulée est l'exception, elle semble devoir être la règle pour la traction électrique.

» Le faible encombrement et le faible poids des moteurs de traction et de leur mécanisme de commande permet de laisser disponible presque tout l'espace au-dessus du châssis pour le transport des voyageurs ou des marchandises et de construire des automotrices ou des fourgons automoteurs aussi puissants que des locomotives à vapeur de 2 à 3 m² de surface de grille.

» La capacité de travail des locomotives à vapeur est limitée par la force musculaire des chauffeurs, par la capacité des tenders en eau et en charbon et par la qualité du combustible brûlé dans le foyer.

» Un chauffeur même entraîné ne peut guère charger plus de 1,5 tonne à l'heure pendant 3 heures ou 3,5 heures ; passé ce temps, il doit être relayé ; pour obvier à ce grave inconvénient, on utilise aux Etats-Unis des foyers à chargement automatique (charbon ordinaire, charbon pulvérisé, pétrole), qui peuvent fonctionner tant qu'il y a du combustible et de l'eau dans le tender. Ces appareils ne sont réellement pratiques que pour les machines à vapeur de très grande puissance, et ils ne paraissent pas donner des résultats aussi économiques que ceux que l'on obtient avec le chauffage à main.

» Avec les tenders de 40 à 50 t employés en Europe, on ne peut guère transporter plus de 7 à 8 tonnes de charbon et une vingtaine de tonnes d'eau, ce qui assure l'alimentation en charbon d'une machine de 4 m² de surface de grille, marchant à pleine charge, pendant 3 ou 4 heures. Aux Etats-Unis, on emploie des tenders de 70 à 80 t contenant 15 à 16 tonnes de charbon et une quarantaine de tonnes d'eau.

» On se contente d'une réserve d'eau relativement plus faible

que celle de charbon, en raison de la facilité et de la rapidité de remplissage des tenders en gare même, sans manœuvre de machines.

» Dans certains cas spéciaux, on peut assurer, au moyen de rampes d'eau spéciales du genre de celle étudiée par M. Ramsbottom, le rechargement du tender en marche ⁽¹⁾.

» Le charbon employé contenant, nécessairement, une proportion de cendres assez forte, il est indispensable, au bout de quelques heures de marche, de procéder à un décrassage complet du foyer et à la réfection des feux. Les grilles à décrassage automatique ne permettent pas de prolonger la période d'utilisation des locomotives au delà de 3 ou 4 heures si l'allure de la combustion est un peu poussée.

» Avec les machines électriques, on ne rencontre aucune limitation de ce genre, la puissance étant fournie par des stations génératrices marchant nuit et jour et susceptibles de grandes surcharges ; quant aux transformateurs d'énergie électrique en énergie mécanique que constituent les moteurs de traction, ils peuvent développer une puissance moyenne soutenue considérable, depuis l'adoption de l'isolement au mica et du soufflage forcé, puissance en général très supérieure à celles qu'ils ont à fournir en service courant.

» En pratique, la seule limite de durée de marche soutenue semble devoir être, pour des machines bien construites, celle correspondant au parcours des sections électrifiées. C'est ainsi que les locomotives du Chicago-Milwaukee and St-Paul Railway, construites en vue de trainer des trains dans les Montagnes-Rocheuses, sur un parcours de 400 km sans relais (parcours double de celui des machines à vapeur anciennement en service), assurent maintenant la remorque, sans relais, de bout en bout de la ligne électrifiée d'Harlowton à Avery (800 km).

» Les locomotives électriques que nous avons commandées ont été étudiées en vue de permettre de conduire à destination les trains auxquels elles auront été attelées, de Paris à Brive sans relais, par exemple. Le parcours moyen annuel des machines à voyageurs semblerait donc devoir être du même ordre que celui des voitures et dépasser 100 000 km.

(1) Avec une rampe de 500 m de longueur, on peut faire monter dans le tender une dizaine de mètres cubes d'eau.

» La machine électrique, qui peut marcher pendant longtemps sans arrêts, est, de plus, constamment disponible, car on n'a à effectuer journellement sur elle aucun travail absolument urgent. Il est loin d'en être de même avec la locomotive à vapeur. Il faut, en effet, sur ces machines, procéder, avant le départ, à une préparation longue et en somme assez délicate, comprenant notamment le chargement du tender en eau et en charbon et la mise sous pression. Cette mise en ordre de marche exige un travail d'une durée d'au moins une heure et demie, même dans les dépôts modernes bien outillés et bien conduits. Après le travail utile en ligne, la locomotive doit rentrer au dépôt pour y être nettoyée et mise, soit en ordre de marche, soit en veilleuse.

» Pour le décrassage et la mise en veilleuse, il faut ajouter de trois quarts d'heure à une heure de travail.

» Même avant la mise en complète application de la journée de huit heures, on pouvait dire que l'utilisation journalière moyenne d'une locomotive à vapeur était de l'ordre de 3 heures. En y comprenant les périodes de préparation et de mise en réserve, la durée de service est d'environ 6 heures. Une locomotive est donc, entre les mains des équipes de conduite, pendant le quart, et en service utile, pendant le huitième de la journée. Ces durées moyennes d'utilisation sont à peu près les mêmes dans tous les pays du monde. M. Aspinall décompose la vie des machines à vapeur anglaises en trois périodes :

- » Une de 12 h de repos complet ;
- » Une de 6 h 45 m de service de traction ;
- » Une de 5 h 15 m de nettoyage et d'entretien, chaudière sous pression.

» Les locomotives électriques peuvent travailler pratiquement de 20 à 23 heures sur 24. La visite journalière et le nettoyage sommaire ne demandent pas plus de trois quarts d'heure à une heure et peuvent, d'ailleurs, être pratiquement effectués pendant les stationnements en gare sans prévoir de battement spécial.

» C'est pour cette raison, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, que le parcours moyen des tracteurs électriques est au moins double de celui des locomotives à vapeur, même dans le cas d'exploitation particulièrement difficile comme celle de la section d'Orsay à Austerlitz et Juvisy.

» Le personnel nécessaire pour la conduite des machines est mal utilisé avec la traction à vapeur, car il est nécessaire, pour

éviter des incidents trop nombreux, d'affecter spécialement à chaque machine une équipe de conduite comprenant chacune un mécanicien et un chauffeur. Ces agents sont, comme nous l'avons vu, occupés à la préparation et à la mise en réserve des machines pendant un temps sensiblement égal à celui consacré au travail utile en ligne.

» Avec la traction électrique, il n'y a pas lieu de prévoir une pareille spécialisation et la conduite des trains peut être assurée en complète « banalité » : un mécanicien quelconque pouvant conduire une machine quelconque. Une même machine pourra être confiée successivement à deux ou trois équipes dans la même journée, de manière à obtenir l'utilisation maximum du personnel de conduite. La banalité sera particulièrement précieuse pour l'organisation du travail depuis l'application de la journée de huit heures.

» Le personnel sédentaire des dépôts sera très notablement réduit du fait de la disparition de plusieurs catégories d'agents tels que : les tubistes, les laveurs de chaudières, les manœuvres des cendres et des machefers, des fosses à piquer, des fosses de lavage ; les charbonniers, les mécaniciens d'appareils de manutention de combustible ou de prises d'eau, etc... Une étude faite pour les dépôts de la région parisienne fait ressortir une réduction du personnel sédentaire d'environ 35 pour 100. Si on tient compte des réductions probables du personnel de conduite, on peut estimer à 50 pour 100 la réduction de l'effectif total des agents des dépôts.

» Dans les ateliers, la réduction du personnel dépendra de la qualité du matériel électrique qui nous sera fourni.

» Si les constructeurs français arrivent, comme il y a tout lieu de le croire, à réaliser des machines aussi robustes et aussi soignées que celles que nous avons vu fonctionner aux Etats-Unis, on peut espérer que les dépenses de réparation de tracteurs électriques seront de 50 à 70 pour 100 plus faibles que celles des locomotives à vapeur. Dans certaines installations américaines, les réparations du matériel électrique proprement dit, semblent être minimales, si l'on en juge par le nombre d'électriciens et de bobineurs employés à ce genre de travail. Au New-York-Central et au Chicago-Milwaukee and St-Paul Railway notamment, le travail d'entretien et de réparation des locomotives électriques semble être pratiquement limité à l'entretien des parties mécaniques.

» Au point de vue de la robustesse, les locomotives à vapeur ne sont pas comparables aux locomotives électriques, car certains de leurs éléments travaillent dans des conditions exceptionnellement difficiles. La chaudière fonctionne, en général, à des allures de combustion et de vaporisation de 7 à 10 fois plus grandes que celles pratiquées dans les générateurs des usines de production. Les pressions et les températures de surchauffe que l'on est forcé d'adopter pour améliorer le rendement de la machine à vapeur à échappement libre entraînent une détérioration rapide, et il faut accepter de procéder à une réparation importante tous les 4 ou 5 ans (100 000 à 150 000 km) et au changement complet de la plaque tubulaire et des tubes tous les 10 ans environ (250 000 à 300 000 km).

» La simplicité de la conduite d'un tracteur électrique est telle que le temps nécessaire à la formation d'un électricien-conducteur ne dépend, en fait, que de son aptitude à reconnaître les signaux, alors qu'il faut plusieurs années pour former un bon mécanicien de locomotive à vapeur.

» Installé confortablement dans une cabine de manœuvre, claire, propre et aérée, devant des appareils de commande peu nombreux, simples et faciles à manier, l'électricien-conducteur n'a d'autre préoccupation que l'observation des signaux. Il n'est gêné par rien dans la surveillance de la voie, ni par la fumée de sa propre machine, ni par celle des autres locomotives en circulation.

» Le travail des électriciens-conducteurs étant beaucoup moins pénible et plus attrayant que celui des mécaniciens et des chauffeurs, le recrutement de ces agents sera beaucoup plus facile. La meilleure utilisation du personnel et la réduction des connaissances professionnelles nécessaires aura une influence très heureuse, non seulement sur les dépenses d'exploitation, mais encore sur l'organisation même des services.

» En ce qui concerne le rendement, les machines à vapeur et électriques ne sont pas directement comparables, car l'une forme un ensemble complet absolument indépendant et se suffisant à lui-même, alors que l'autre n'est que le dernier maillon d'une longue chaîne d'appareils effectuant des transformations successives.

» Le cylindre de la machine à vapeur à échappement libre transforme l'énergie contenue dans la vapeur en énergie mécanique avec un rendement n'excédant guère 10 à 12 pour 100 dans

les meilleures conditions de marche. La chaudière a un rendement assez variable compris entre 50 et 70 pour 100 suivant les allures de combustion et le mécanisme, un rendement de 94 à 95 pour 100. Le rendement global, en partant du charbon pour l'énergie disponible à la jante des roues motrices ne dépasse donc pas 5 pour 100 en marche normale.

» Des essais effectués au point fixe dans les laboratoires américains du Pennsylvania Railroad (à Altona), de l'Université d'Illinois et de celle de Purdue montrent que, dans des conditions particulièrement favorables (les pertes par rayonnement de la chaudière étant notablement réduites ainsi que celles dues aux trépidations et aux chocs sur les voies), le rendement global de la machine à la jante des roues était compris entre 4 et 8 pour 100.

» En service courant le rendement moyen doit être notablement réduit et de l'ordre de 3 à 5 pour 100.

» Le rendement au crochet d'attelage du tender, où se produit le travail réellement utile est encore plus faible, la locomotive et le tender absorbant, pour se remorquer eux-mêmes, un travail considérable.

» Pour une machine « Pacific » marchant à environ 90 km:h, la puissance disponible au crochet représente à peine 60 pour 100 de la puissance à la jante (*). Pour des machines à marchandises, la proportion est analogue bien que plus nette encore, en raison de l'augmentation rapide de la résistance au roulement des machines avec le nombre des essieux accouplés. A 40 km:h, la résistance au roulement par tonne est d'environ 7,5 kg pour une machine à 2 ou 3 essieux, 15 kg pour une machine à 4 essieux, et 25,4 kg pour une machine à 5 essieux.

» En moyenne, le rendement de la traction à vapeur ne doit pas dépasser 2 pour 100 ; à ce rendement correspond, par tonne-kilomètre remorquée en palier à la vitesse de 30 à 40 km:h (travail d'environ 3 500 kilogrammes-mètres), une consommation d'environ 58 grammes de charbon.

» Le rendement d'une installation de traction électrique, depuis l'entrée des sous-stations jusqu'au crochet d'attelage des tracteurs, peut être évaluée à 50 pour 100, en comptant environ 83 pour 100

(*) Note sur les nouvelles locomotives compound à 4 cylindres de la Compagnie d'Orléans par M. Paul Conte.

Pour un poids remorqué de 40 t environ, la puissance nécessaire pour la propulsion des locomotives et des tenders varie de 530 à 590 chevaux pour une puissance totale de 1 430 à 1 490 chevaux.

pour la transformation dans les sous-stations rotatives, 95 pour 100 pour la distribution, 85 pour 100 pour la locomotive en tant que transformateur d'énergie électrique en énergie mécanique à la jante des roues motrices, 75 pour 100 pour la transformation de la puissance à la jante en puissance utile au crochet.

» La consommation d'énergie électrique, par tonne-kilomètre remorquée en palier à la vitesse de 30 à 40 km:h (travail utile d'environ 3 500 kg-m.) est donc de l'ordre de 19 watts-heure. Nous voyons donc qu'à service égal, un kilowatt-heure remplacera une quantité de charbon de $\frac{58}{19}$ kg, soit environ 3 kg.

» Cette valeur du coefficient d'équivalence entre les consommations d'énergie électrique et de charbon pour un même travail utile aux crochets d'attelage est très variable ; elle n'est donnée ici qu'à titre de simple indication.

» Pour un service de montagne, où des machines à vapeur à 4 ou 5 essieux couplés seront remplacées par des machines électriques articulées à adhérence totale pouvant fonctionner en récupération pendant la descente des pentes, la valeur de ce coefficient sera supérieure à 3.

» Il en sera peut-être de même pour les services de voyageurs à grande vitesse ; le travail absorbé par la locomotive électrique pour se remorquer elle-même devant être notablement plus faible que pour la machine à vapeur. Le rapport entre le poids total des machines et leur poids adhérent passerait de 2,5 pour la locomotive à vapeur à 1,3 ou 1,7 pour la machine électrique suivant le type de tracteurs adopté (*).

(*) Une machine Pacifique de 1 800 chevaux, ayant un poids adhérent de 54 t, a un poids total 2,5 fois plus grand ($90 + 45 = 135$ t env.). Les machines à grande vitesse d'essai construites pour la Compagnie d'Orléans ont des poids adhérents beaucoup plus élevés :

72 t pour les locomotives du type 2D2 ; 90 t pour les machines 2C + C2 (pour un même poids total de 116 t).

Les rapports entre poids total et adhérent sont alors respectivement :

$$\frac{116}{72} = 1,6 \text{ et } \frac{116}{90} = 1,28.$$

Pour remplacer les machines « Pacifique » actuellement en service, il suffirait de construire des machines électriques à engrenages du type 2C1 de 2 700 chevaux de puissance pendant une heure et 2 300 chevaux de puissance continue pouvant remorquer en marche soutenue en palier 450 à 500 t à la vitesse de 100 km : h.

Le rapport du poids total au poids adhérent serait dans ce cas, $\frac{105}{60} = 1,75$.

Remarquons que, pour les très longs parcours comme ceux envisagés actuellement, l'emploi des machines électriques symétriques, n'a plus qu'un intérêt assez restreint.

» Bien entendu, la notion de coefficient d'équivalence n'a de sens que si les conditions de service restent les mêmes dans l'exploitation électrique et l'exploitation à vapeur.

» Si on compare dans n'importe quelle installation effectivement réalisée, les consommations de charbon avant électrification et les dépenses d'énergie après, on trouve des rapports plus petits que 3, car on met en général en balance deux services qui ne sont aucunement comparables. On profite généralement de l'électrification pour améliorer le service et augmenter la vitesse des trains, et on donne aux tracteurs électriques des poids et des puissances plus grands que ceux qui seraient immédiatement nécessaires pour assurer le même service que la traction à vapeur.

» C'est ainsi que les tracteurs électriques en service depuis 1900 sur la ligne de Paris à Juvisy, construits pour remorquer normalement des trains de 180 t et exceptionnellement des trains de 240 t peuvent encore trainer entre Orsay et Austerlitz, où se trouve une rampe, d'ailleurs courte, de 11 pour 1 000, des trains de 650 tonnes.

» Le service pour lequel la traction à vapeur semble être le mieux placée au point de vue d'une comparaison est le service normal des trains de marchandises. C'est dans ce cas que le coefficient d'équivalence risquerait peut-être d'être inférieur à 3. C'est pour cette raison, en vue d'améliorer le rendement moyen de l'exploitation électrique, que nous avons prévu, dans les électrifications en cours à la Compagnie d'Orléans, des tracteurs à adhérence totale, aussi légers que possible ⁽¹⁾, pouvant travailler seuls ou accouplés par deux suivant la charge remorquée. Une seule unité de 61 t sera susceptible de remorquer un train de 1 000 t entre Paris et Vierzon à la vitesse de 40 km:h ; pour des charges plus élevées, les trains seront remorqués en double traction.

» La récupération, nous l'avons déjà indiqué, augmentera assez notablement le rendement de la traction électrique dans l'exploitation des lignes de montagne à pente continue ou en dents de scie ; elle procurera une amélioration notable du service en per-

⁽¹⁾ Malgré tous nos efforts, nous n'avons pu obtenir des constructeurs français la recherche de la légèreté et nos locomotives nouvelles vont peser 10 t de plus que les locomotives de la série E1 à E13 en service sur la ligne de Paris à Juvisy, bien que le poids de l'équipement électrique moderne à 1 500 volts ne soit pas plus grand que celui du matériel ancien à 600 volts.

mettant avec les trains munis du frein continu, de descendre les pentes à une vitesse supérieure à celle qui serait admissible en marche libre; elle permettra aussi de réduire l'usure des sabots de frein qui ne seront appliqués sur les roues que pour les arrêts ou en cas de danger au lieu d'être normalement en prise pendant les descentes. Il ne faut pas cependant exagérer l'importance de la récupération ; si elle permet de réaliser une économie appréciable d'énergie, elle ne constitue qu'un mode de freinage imparfait qu'il ne faut employer systématiquement que quand la sécurité de la marche est assurée par ailleurs.

» Cette réduction d'usure des sabots de frein s'applique, non seulement aux freins des locomotives, mais encore, et surtout, à ceux des voitures et wagons et elle peut procurer une économie notable de matière et de main-d'œuvre.

» D'ailleurs, au point de vue de l'entretien du matériel roulant, des voitures à voyageurs notamment, il est certain que la suppression de la fumée procurera également une économie qui, bien que ne pouvant pas être chiffrée, n'en existera pas moins. Il y a lieu de penser aussi que la facilité de manœuvre des locomotives électriques, leur démarrage progressif sans patinage réduiront aussi la fréquence des ruptures d'attelage et leur conséquence.

» Ajoutons que l'emploi généralisé de la traction électrique permettrait de simplifier notablement les organisations de dépôts et de supprimer entièrement les prises d'eau. Les tracteurs électriques ayant un rayon d'action au moins double de celui des machines à vapeur, le nombre des dépôts pourrait être réduit d'au moins moitié. Sur le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, cette réduction de moitié a été faite à priori; il semble, d'après les résultats déjà obtenus, que l'on pourra aller plus loin et se contenter d'un seul atelier régional et de dépôts rudimentaires constitués par de simples remises où on ne fera que des travaux de bricole.

» Comme les machines électriques sont en général symétriques, on pourra supprimer, dans les dépôts, les plaques tournantes qui constituent un danger au point de vue de l'exploitation, surtout au point de vue militaire, puisque l'arrêt d'un pont peut immobiliser un grand dépôt.

» Ces avantages nombreux et divers prennent une importance toute particulière quand on les étudie au point de vue de l'orga-

nisation générale d'une exploitation de chemin de fer ; certaines propriétés caractéristiques de la traction électrique, telles que la divisibilité de la puissance, la facilité de la commande à distance, le faible encombrement des moteurs, etc., peuvent permettre, par une adaptation progressive et raisonnée, de résoudre des problèmes non encore posés d'une façon concrète et d'améliorer les méthodes d'exploitation en taylorisant, si on peut dire, les services auxquels l'électrification sera étendue.

» L'exploitation par trains à unités motrices multiples a entièrement transformé les transports en commun, en rendant possible l'organisation pratique de services rapides, à arrêts fréquents et à grand débit : l'emploi systématique de grands efforts accélérateurs pendant le démarrage, retardateurs pendant le freinage, a permis d'augmenter le nombre de trains en lignes, de réduire leur écartement en multipliant le nombre de cantons de block ; avec des moteurs puissants, on est parvenu à réaliser, malgré la fréquence des arrêts, des vitesses commerciales élevées, même pour des trains relativement lourds.

» L'application des mêmes principes aux services de banlieue offrira de grandes facilités pour les communications entre certaines agglomérations, actuellement assez mal desservies, et contribuera à leur développement industriel et commercial. Il est probable que, dans un avenir plus ou moins éloigné, il n'y aura plus de distinction pratique entre ligne métropolitaine et ligne de banlieue et qu'on verra un peu partout, comme on le voit déjà à Londres, les trains de banlieue emprunter les voies de réseaux de transports en commun.

» L'emploi de rames automotrices symétriques, comme celles qui circulent depuis 1900 sur la ligne du Quai d'Orsay à Juvisy ou des Invalides à Versailles permettent d'ailleurs d'augmenter notablement la capacité des grandes gares terminus grâce à une meilleure utilisation des quais de départ et d'arrivée.

» Dans l'exploitation des lignes de montagne, les trains à tracteurs multiples ont rendu déjà des services et en rendront de plus en plus, en permettant de grands efforts de traction sans fatiguer ni les voies ni les attelages.

» On peut, avec la traction à unités multiples, répartir la puissance motrice sur un nombre d'essieux assez élevé pour que la charge par roue motrice ne dépasse pas 15 à 16 tonnes, limita-

tion qui sera précieuse pour certaines lignes construites dans de mauvais terrains ou comportant des ouvrages d'art peu résistants.

» En répartissant d'ailleurs les tracteurs tout le long du train et en en plaçant notamment en tête et en queue, on peut constituer des rames lourdes facilement manœuvrables d'un poste de commande unique sans risquer des ruptures d'attelages ni des dérives dangereuses. A une augmentation de la vitesse et du tonnage des trains correspond un accroissement de la capacité des lignes qui, dans bien des cas, atteindra un degré tel qu'il dispensera pendant longtemps de doubler des lignes à voie unique.

» Tous les systèmes de commande à distance de ces tracteurs multiples, dénommés par les Américains, appareils de « train control », comportent l'emploi de servomoteurs soit magnétiques, soit électriques, soit pneumatiques, commandés par un certain nombre de fils pilotes courant tout le long de la rame sur les remorques comme sur les tracteurs. Ces systèmes ont tous un fonctionnement sûr, mais ils exigent l'équipement électrique et par suite la spécialisation des remorques intermédiaires : voitures, wagons ou fourgons entrant dans la composition des trains.

» Ces systèmes sont donc inapplicables à la remorque des trains de marchandises ordinaires formés avec des véhicules de toutes provenances et de toutes natures ; c'est pour pouvoir rendre la traction par unités motrices multiples applicable aux trains de marchandises que M. Sabouret et moi-même avons étudié des systèmes de train control sans fil ou plutôt à un fil unique, confondu avec la ligne de contact elle-même.

» Les essais effectués sur la ligne de Paris à Juvisy sur des rames automotrices en superposant au courant de traction à 600 volts un courant alternatif de fréquence comprise entre 2 000 et 4 000 périodes par seconde, ont montré que, malgré l'absorption par les moteurs, la sélection était possible et que l'intensité du courant alternatif de « control » recueilli à 400 ou 500 mètres du tracteur émetteur dépassait 3 à 4 ampères ; cette intensité est plus que suffisante pour faire fonctionner des relais. Ces essais seront repris dès que nous disposerons de lignes aériennes de contact au départ de Paris ou de Juvisy.

» Toutes les dispositions possibles ont été proposées pour la répartition des tracteurs dans les trains de marchandises : sur les

lignes à fortes pentes, les Italiens placent un ou deux tracteurs en tête et un en queue ; il en est de même pour le Norfolk and Western Railway. Au Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, on préfère placer un tracteur en tête et un autre au milieu, afin que le mécanicien de la machine placée au centre puisse régler la marche de sa locomotive d'après l'état de tension des attelages. Nous pencherions plutôt vers cette dernière disposition dans le cas qui nous intéresse plus particulièrement pour le moment, celui de la ligne de Paris à Brive.

» Pendant la traversée de la ligne principale, on aurait ainsi en ligne un train long de fort tonnage ; à l'arrivée en gare, ces trains se diviseraient en deux, chaque demi-train pouvant être conduit par la machine placée à sa tête sur des voies de réception différentes.

» La traction à unités multiples ainsi appliquée permettrait donc d'augmenter la capacité de débit de la ligne sans entraîner une augmentation correspondante de longueur des voies de réceptions dans les gares de marchandises.

» En ce qui concerne les voies, il est indiscutable que leur équipement électrique, ligne de contact aérienne ou 3^e rail, en complique beaucoup l'installation, la surveillance et l'entretien. La signalisation est beaucoup plus difficile à réaliser tant en ce qui concerne l'emplacement même des signaux, au moins dans le cas de lignes de contact aériennes, qu'en ce qui concerne l'organisation des circuits de voie. L'utilisation des rails de roulement, comme conducteurs de retour, impose, en effet, soit l'emploi du courant alternatif pour l'alimentation des circuits, soit l'installation de conducteurs spéciaux de signalisation.

» Les causes d'incident et d'interruption de service sont plus grandes pour une voie équipée électriquement que pour une voie ordinaire du fait de l'augmentation de l'appareillage et des mesures spéciales doivent être prises pour assurer la continuité du service.

» Mais si ces additions entraînent des dépenses supplémentaires dont nous avons d'ailleurs tenu compte précédemment dans l'établissement du bilan de l'électrification, il semble aussi que la substitution de l'électricité à la vapeur est susceptible de procurer, même aux services de surveillance et d'entretien des voies, des avantages intéressants. Il en résultera des économies qui, bien que

ne pouvant être chiffrées exactement, viendront en déduction des dépenses que nous avons comptées par ailleurs en totalité. Ces économies proviendront des diverses causes suivantes :

» 1° Réduction de l'usure locale et anormale des rails due aux patinages de la locomotive à la sortie de certaines gares ou au glissement des véhicules à roues bloquées le long de lignes à fortes pentes.

» 2° Diminution de l'usure des rails dans les courbes, dues au passage de locomotives à châssis rigide d'inscription difficile.

» 3° Suppression presque complète du martelage des rails dû à un défaut d'équilibrage des pièces en mouvement (contrepoids ou bielles).

» 4° Atténuation des mouvements de terrain ou des détériorations d'ouvrages d'art dûs au passage de machines trop lourdement chargées.

» 5° Suppression des fumées corrosives et irrespirables dans les tunnels.

» 6° Suppression des incendies consécutifs à un déraillement ou un tamponnement causés par le combustible incandescent contenu dans le foyer.

» 7° Suppression des incendies de propriétés longeant le chemin de fer (meules, moissons, bois, etc...) provoqués par les flammèches et escarbilles sortant des cheminées.

» Les renseignements recueillis dans tous les pays du monde où ont été installées des lignes aériennes ou à 3^e rail montrent que, si les lignes de contact ont été bien étudiées et bien construites, on ne rencontre aucune difficulté spéciale d'entretien. Au Norfolk and Western, on nous a montré comment on pouvait faire des réparations sur une ligne à 11 000 volts sans interrompre le courant et, dans aucun cas, nous n'avons pu constater de trouble sérieux dans le fonctionnement des lignes. Ce n'est que pour l'entretien courant des lignes triphasées italiennes à deux systèmes de conducteurs isolés l'un de l'autre, que le chemin de fer s'impose la sujétion d'un arrêt complet d'exploitation pendant deux heures par jour. Avec les lignes simples et robustes comme celles qui sont prévues pour la traction électrique à 1 500 volts, il n'y a à tenir compte d'autres aléas que ceux inhérents à toute installation nouvelle dont il faut acquérir la pratique.

II^e PARTIE

DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'ÉLECTRIFICATION DE LA COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DE PARIS A ORLÉANS

» Les lignes que la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans se propose d'électrifier en première étape sont celles de Paris à Brive (528 km), de Saint-Sulpice à Gannat (190 km) et de Brive à Clermont (198 km), ayant un développement global de 916 km de route et 1 635 km de voies principales, sans compter les voies de garage et de triage.

» Il s'agit donc d'électrifier une longue ligne à grand trafic ne comportant pas de fortes déclivités et deux lignes de montagne à profil accidenté et d'exploitation difficile. L'équipement de la ligne de Paris à Brive, à grand trafic, se justifie tout naturellement par les considérations précédemment exposées, la densité linéaire de consommation étant actuellement de 700 tonnes de charbon par kilomètre, et devant atteindre vraisemblablement 1 millier de tonnes vers 1930 ; nous aurons donc une marge suffisante pour parer à toute éventualité, à une baisse considérable des cours du charbon par exemple.

» Pour les deux lignes de montagne, l'électrification est justifiée, non seulement par la considération du trafic qui est dès maintenant suffisant, mais encore par des considérations accessoires qui prennent ici une importance prépondérante ; l'électrification permettra, grâce à l'augmentation considérable de capacité de trafic qu'elle procurera, de retarder pendant longtemps le doublement de lignes arrivées dès maintenant assez près de leur limite de capacité.

» Le débit des deux lignes à voie unique sera augmenté, grâce à un accroissement parallèle du tonnage et du nombre des trains.

» L'emploi de tracteurs électriques plus puissants que les locomotives à vapeur actuellement en service, utilisés soit isolément, soit en traction multiple, permettra d'accroître la vitesse des trains en même temps que leur tonnage. En rendant la vitesse des trains de marchandises voisine de celle des trains de voyageurs, c'est-à-dire en rendant les marches de tous les trains à peu près parallèles, on améliore grandement le graphique et on fait passer un nombre de trains plus grand sans modifications importantes aux voies d'évitement.

» La consommation de charbon sur l'ensemble de ces 3 lignes atteignait 450 000 t, en 1913, et on peut penser qu'elle dépassera 700 000 t, en 1930, date à laquelle l'électrification aura pris son plein développement. Nous allons indiquer rapidement quelles sont les mesures qui ont été prises pour remplacer dans la plus large mesure possible la houille noire par la houille blanche, pour la remorque des trains électriques.

» Nous examinerons successivement :

» 1° La production de l'énergie dans des usines hydrauliques et thermiques, le courant étant produit sous forme de courant triphasé de fréquence 50 périodes par seconde.

» 2° La transmission de l'énergie, le courant étant transmis sur un double réseau, l'un à 150/220 kilovolts, l'autre à 90 kilovolts.

» 3° La transformation de l'énergie, le courant triphasé à 50 périodes par seconde étant transformé en courant continu 1 500 volts dans une série de sous-stations rotatives.

» 4° La distribution de l'énergie, le courant continu étant amené aux tracteurs par des lignes de contact aériennes et des 3° rails.

» 5° L'utilisation de l'énergie, l'énergie électrique étant finalement transformée en énergie mécanique dans des tracteurs de différents types : automotrices, locomotives à marchandises, locomotives à grande vitesse.

» Nous ne décrirons pas ici les dispositions de détail que nous avons adoptées pour les différentes parties de l'installation et nous nous bornerons à mettre en évidence les principes qui nous ont guidés dans nos études et les buts que nous nous sommes assignés.

PRODUCTION DE L'ÉNERGIE

» L'énergie électrique nécessaire à l'alimentation des lignes que la Compagnie d'Orléans se propose d'électrifier en première étape sera fournie par deux groupes d'usines distincts :

» Pour la section de Paris à Châteauroux, par les centrales thermiques de l'Union d'Electricité (Gennevilliers, Vitry, Billancourt, etc.) et par la centrale hydraulique de la société Union hydroélectrique (Eguzon sur la Creuse).

» Pour le reste des lignes, par les centrales hydrauliques que la Compagnie d'Orléans aménage dans le Massif-Central (Coindre sur les deux Rhue, la Cellette sur le Chavanon, Vernéjoux sur la

Dordogne). La carte ci-jointe (fig. 5) précise la situation géographique des usines en question.

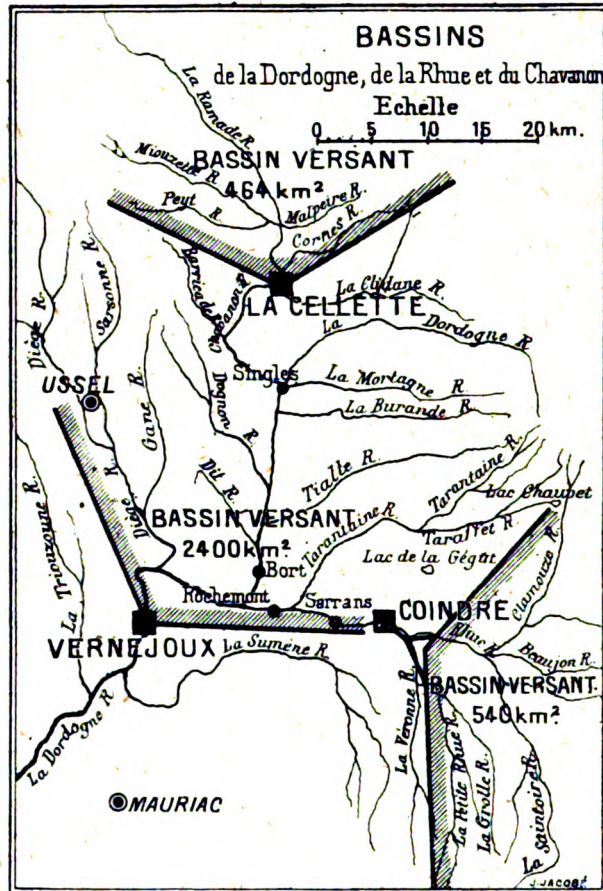


Fig. 5. — Carte des Bassins de la Dordogne, de la Rhue et du Chavaron

» Les caractéristiques de ces différentes usines hydrauliques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	Hauteur de chute mètres	Surface du bassin versant km²	Débit moyen annuel en mètres³ par seconde Période 1912-1921	Production moyenne annuelle millions de kw-h Période 1912-1921	Puissance approximative installée kilowatts
Eguzon	58	2 400	35,2	120	50 000
Coindre	120	540	14,5	104	25 000
La Cellette . .	45 à 80	464	12,2	48	25 000
Vernejoux . . . (Maréges)	60	2 400	63,2	227	60 000

» Les débits moyens mensuels et moyens annuels des rivières du

Massif-Central sont indiqués en litres par seconde et par kilomètre carré sur les figures 6 et 7 ci-contre.

» Les travaux d'installation sont commencés pour trois de ces usines et il est probable qu'entre 1925 et 1927, nous disposerons de celles d'Eguzon, de Coindre et de la Cellette.

» L'usine d'Eguzon sera équipée avec cinq génératrices tripha-

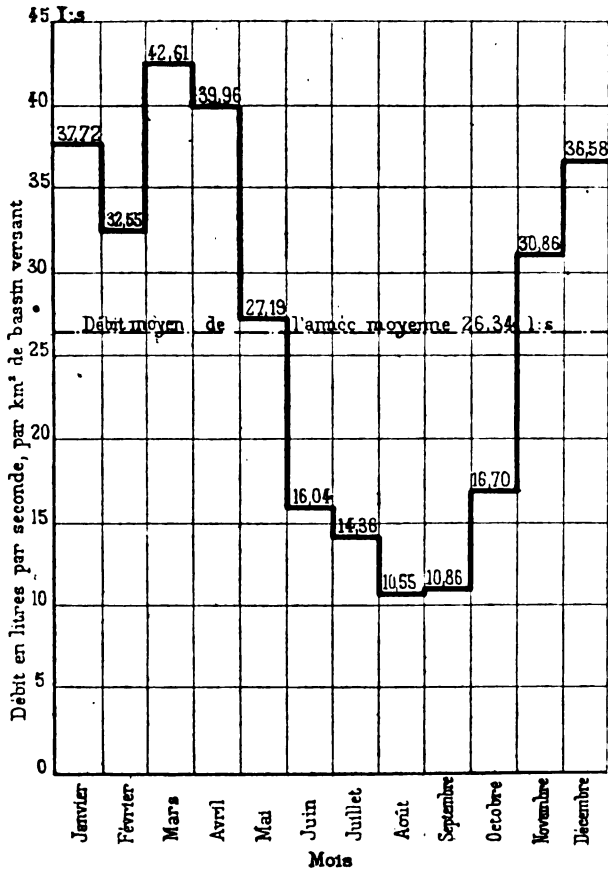


Fig. 6. — La moyenne Dordogne au Chambon et à Vernéjoux. — Bassins versants 4 050 et 2 450 km². — Courbe représentative des débits moyens mensuels en litres par seconde et par kilomètre carré de bassin versant. — Année moyenne de la période 1912-1921.

sées de 10 000 kilowatts, à 10 000 volts, dont quatre seulement seront installées de suite.

» L'usine de Coindre sera équipée avec 3 génératrices de 8 300 kilowatts environ, à 6 000 volts.

» L'aménagement de l'usine d'Eguzon et son exploitation en parallèle avec les usines thermiques de la région parisienne ont

été étudiés de manière que tout se passe comme si l'usine hydraulique constituait pour la superstation de Gennevilliers, un groupe supplémentaire de 40 000 kilowatts.

» Etant donnée l'irrégularité du débit de la Creuse, il ne pouvait être question d'alimenter nos installations de traction avec la seule usine d'Eguzon. C'est pourquoi la Compagnie d'Orléans et l'Union d'Electricité ont fondé en commun la société Union hydroélec-

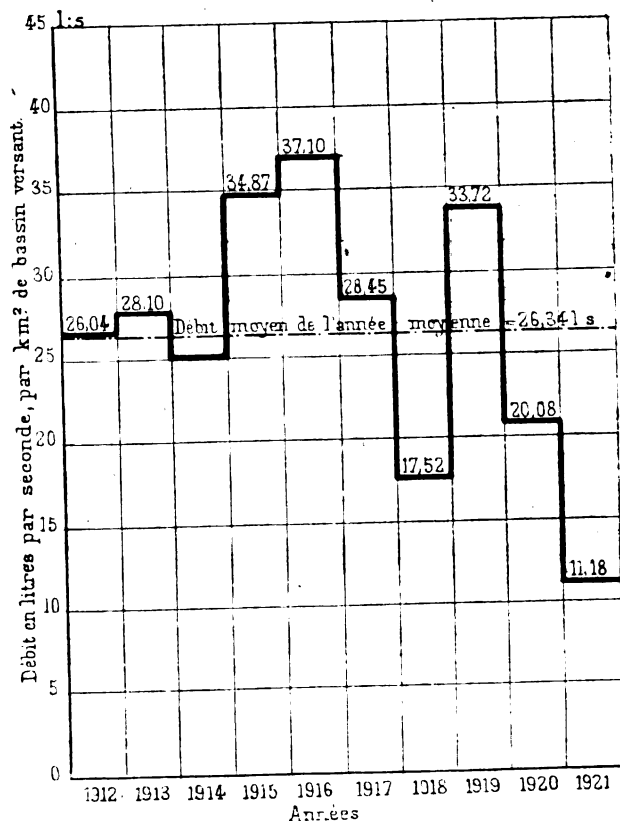


Fig. 7. — La Dordogne au Chambon et à Vernéjoux. — Bassin versant 2 450 et 4 050 km². — Courbe représentative des débits annuels en litres par seconde et par kilomètre carré de bassin versant. — Année moyenne de la période 1912-1921.

trique en vue d'exploiter également en commun l'usine d'Eguzon et de la relier à celles de la région parisienne. L'interconnexion de ces usines permettra aux stations thermiques de réduire leur consommation de combustible tout en assurant à l'Union hydroélectrique, dès l'origine de son exploitation, l'utilisation intégrale de l'énergie disponible dans la Creuse.

TRANSMISSION DE L'ENERGIE

» Le graphique (fig. 8) ci-contre représente schématiquement les liaisons électriques établies entre les usines thermiques de la

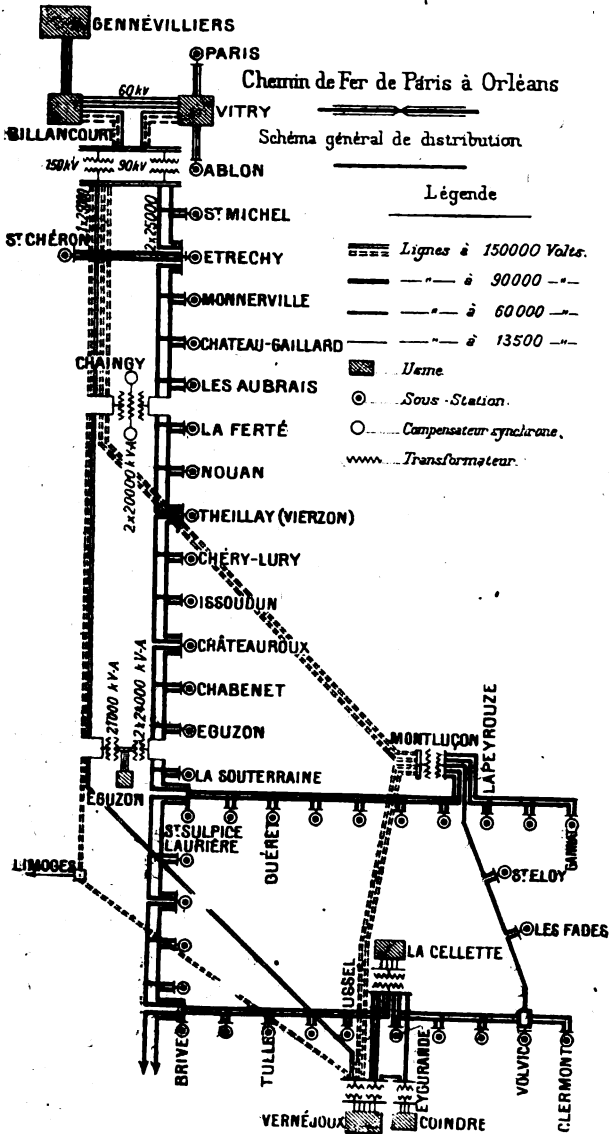


Fig. 8. — Schéma général de distribution.

région parisienne et les usines hydrauliques construites sur la Creuse et dans le Massif-Central.

» Ces liaisons comprennent un double système de lignes à haute

tension, l'un à très haute tension (154 kv) servira à transmettre de grandes quantités d'énergie à grande distance ; l'autre, à tension moyenne (88 kv) ⁽¹⁾, répartira l'énergie entre les diverses sous-stations de traction et les postes annexes de transformateurs statiques.

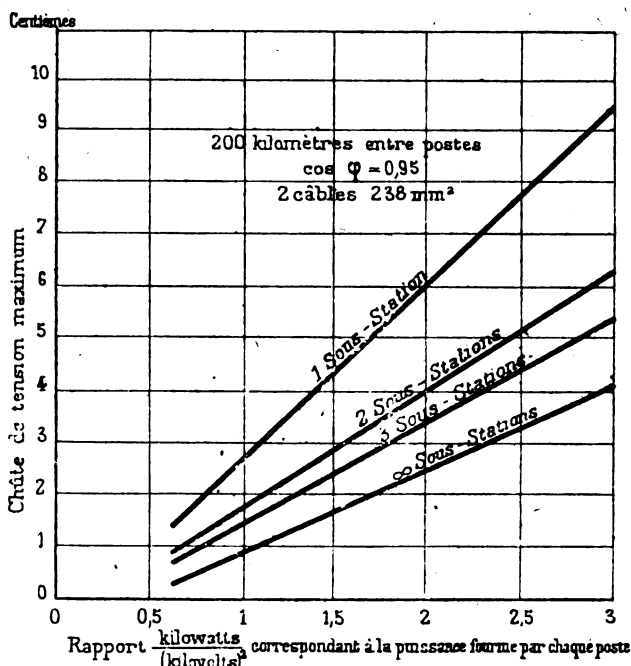


Fig. 9. — Variations de la chute de tension en fonction du rapport kilowatt : (kilovolts)² pour une distance de 200 km entre postes (cos φ = 0,95, section des câbles 238 mm²).

» La jonction entre ces deux systèmes de ligne de transmission sera effectuée en cinq postes principaux : Chevilly, Chaingy, Egu-

(¹) Ces tensions sont à peu près celles que l'on trouve par application de la formule empirique que M. Still a déduite de l'étude comparée d'un certain nombre de réseaux de transmission d'énergie en service aux Etats-Unis. Cette formule, qui donne, en kilovolts, la tension E la plus économique pour la transmission d'une puissance P , en kilowatts, à la distance X , en kilomètres, est :

$$E = 5,5 \sqrt{\frac{X}{1\ 609} + \frac{P}{100}}$$

Pour le cas des lignes construites par la Compagnie d'Orléans correspondant à :

- Pour la haute tension : $X = 500$ km, $P = 25\ 000$ kw,
on trouve $E = 152$ kv.
- Pour la moyenne tension : $X = 125$ km, $P = 20\ 000$ kw,
on trouve $E = 91$ kv.

zon, Montluçon et Vernéjoux ; les trois premiers de ces postes seulement sont en construction.

» La puissance réactive nécessaire au réglage de la tension du système de lignes sera fournie par des compensateurs synchrones installés dans le poste de Chaingy, près Orléans, et par les alternateurs des usines génératrices. Les sous-stations de traction qui ne comprennent que des commutatrices fonctionneront avec un déphasage très faible, ce qui facilitera beaucoup le réglage de la tension.

» Les courbes ci-jointes (fig. 9 et 10), permettent de se rendre

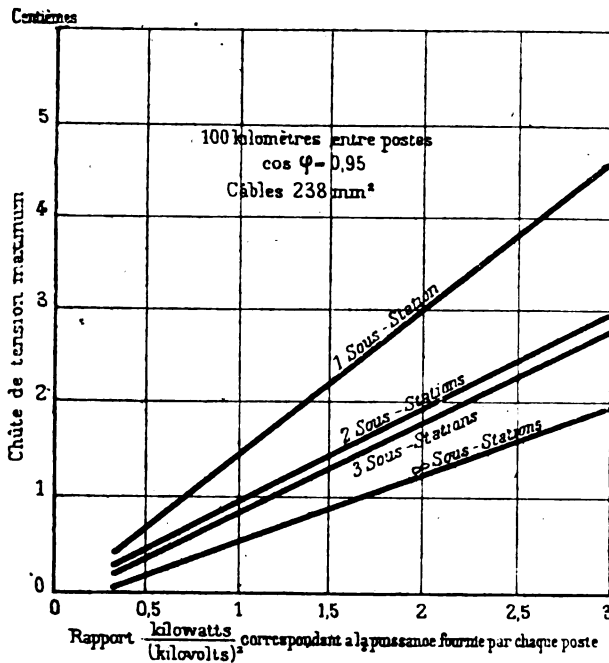


Fig. 10. — Pour une distance de 100 km entre postes (cos $\varphi = 0,95$ section des câbles 238 mm²)

compte de l'ordre de grandeur des chutes de tension qui pourront se produire entre les postes de transformation principaux sur le système de ligne à moyenne tension. Ces courbes ont été calculées en supposant qu'entre deux postes consécutifs distants, par exemple, de 100 ou 200 kilomètres, on installe un nombre variable de sous-stations équidistantes travaillant à chaque instant dans des conditions identiques.

» On peut alors calculer, par récurrence, la valeur en centièmes

des chutes de tension en fonction du nombre de sous-stations et de la puissance fournie par chaque poste (ou ce qui est plus général en fonction du rapport $\frac{P}{V^2}$, puisque, pour une même ligne, les chutes de tension ne dépendent que de ce rapport). On voit que, pour des puissances de 10 000 kilowatts fournies par deux postes à 90 kilovolts ($\frac{P}{V^2} = 1,23$) distantes de 200 kilomètres, la chute de tension en ligne sera de l'ordre de 1,5 pour 100 pour 8 sous-stations réparties entre les deux postes fonctionnant à $\cos \varphi = 0,95$. Pour une seule sous-station, la chute de tension serait de 3,4 pour 100 et pour une infinité de sous-stations, c'est-à-dire pour une charge uniformément répartie, 1,3 pour 100.

» L'ensemble du réseau de transmission d'énergie a été calculé de manière à ce que la variation de tension aux bornes à courant continu des sous-stations soit inférieure à ± 3 pour 100, quelle que soit la répartition de la charge entre les sous-stations, cette charge correspondant, d'ailleurs, à un trafic du réseau de chemin de fer supérieur de 50 pour 100 au trafic actuel ; les chutes de tension seront de l'ordre de ± 5 pour 100 pour un trafic supérieur de 100 pour 100 au trafic actuel.

» Le courant à 60 kilovolts provenant des usines thermiques de la région parisienne sera amené par trois systèmes de 3 câbles monophasés au jeu de barres à 60 kilovolts du poste de Chevilly.

» L'énergie ainsi disponible sera transformée de 60 kilovolts en 90 kilovolts par un jeu de 2 transformateurs statiques de 25 000 kilovolts-ampères, puis envoyée dans les lignes de transmission à 90 kilovolts, et enfin distribuée aux diverses sous-stations. De même l'énergie à 10 kilovolts, produite à Eguzon, sera transformée de 10 kilovolts en 90 kilovolts par deux jeux de transformateurs statiques d'une puissance individuelle de 24 000 kilovolts-ampères chacun.

» Les usines thermiques de la région parisienne pourront échanger du courant avec l'usine hydraulique d'Eguzon par l'intermédiaire de deux jeux de transformateurs, l'un de 21 000 kilowatts, 150/10 kv, placé à Eguzon, l'autre de 25 000 kilowatts, 150/60 kv placé à Chevilly.

» Les réseaux à 150 et 90 kilovolts pourront effectuer des échanges d'énergie à Chaingy (près Orléans), par l'intermédiaire de deux

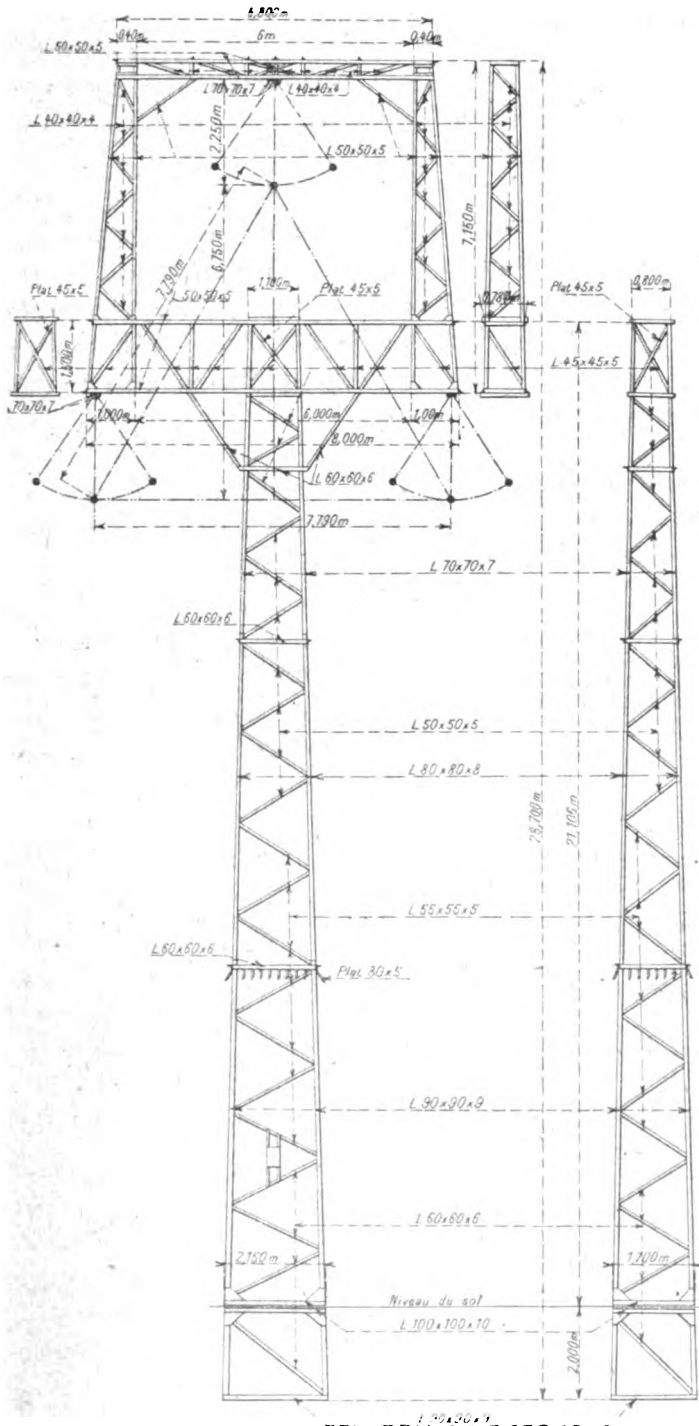


Fig. 11. — Vues en élévation d'un pylone d'alignement de la ligne à 220 000 volts. — Portée 250 m. — 3 câbles aluminium acier 293 8 mm². — 2 câbles de terre acier galvanisé 60 mm².

jeux de transformateurs statiques 150 kv/90 kv, d'une puissance de 20 000 kilowatts chacun. Ces transformateurs seront munis chacun d'un troisième enroulement permettant d'alimenter à 6 000 volts les deux compensateurs synchrones de réglage auxquels il a été fait allusion plus haut.

» Les postes de Vernéjoux et de Montluçon ne seront installés qu'un peu plus tard, en même temps que les usines de Coindre et de La Cellette dont les travaux d'aménagement sont commencés.

» Les deux sous-stations de Paris et d'Ablon seront reliées directement à l'usine de Vitry de l'Union d'Electricité par trois câbles triphasés à 13 500 volts comprenant chacun trois conducteurs de 150 mm² de section.

» LIGNES A 150 KILOVOLTS. — Les lignes à 150 kilovolts seront constituées par 3 conducteurs d'aluminium à âme d'acier ayant chacun une section totale de 293,8 mm² (section de l'aluminium 238 mm²) de 22,3 mm. de diamètre.

» Ces conducteurs seront portés par des chaînes d'isolateurs du type Hewlett (19 isolateurs en alignement, 11 aux ancrages), fixées à des pylônes métalliques espacés d'environ 250 mètres en moyenne. Les points d'attache des trois chaînes d'isolateurs ou des 3 conducteurs formeront un triangle équilatéral à base horizontale de 7,80 mètres de côté.

» La hauteur du fil le plus bas au-dessus du sol au milieu de la portée sera d'environ 10 mètres.

» Deux câbles d'acier galvanisé ayant chacun 60 mm² de section, placés en tête des pylônes dans un même plan horizontal, forment câble de terre. Les pylônes, les écartements entre conducteurs et les diamètres de ces derniers ont été prévus de manière à ce que l'on puisse porter ultérieurement la tension à 220 000 volts, sans que l'on ait à craindre de pertes notables par effet de couronne.

» La figure 11 ci-contre représente les pylônes d'alignement de la ligne à 150 kilovolts.

» Les constantes linéiques électriques de cette ligne sont, pour une température de 20° C et une fréquence de courant d'alimentation de 50 périodes par seconde, approximativement les suivantes :

$$» Z = 0,13 + j 0,12 \text{ ohms par kilomètre.}$$

$$» Y = \quad \quad + j 0,00000266 \text{ mhos par kilomètre.}$$

» La longueur d'onde propre de la ligne proprement dite, abs-

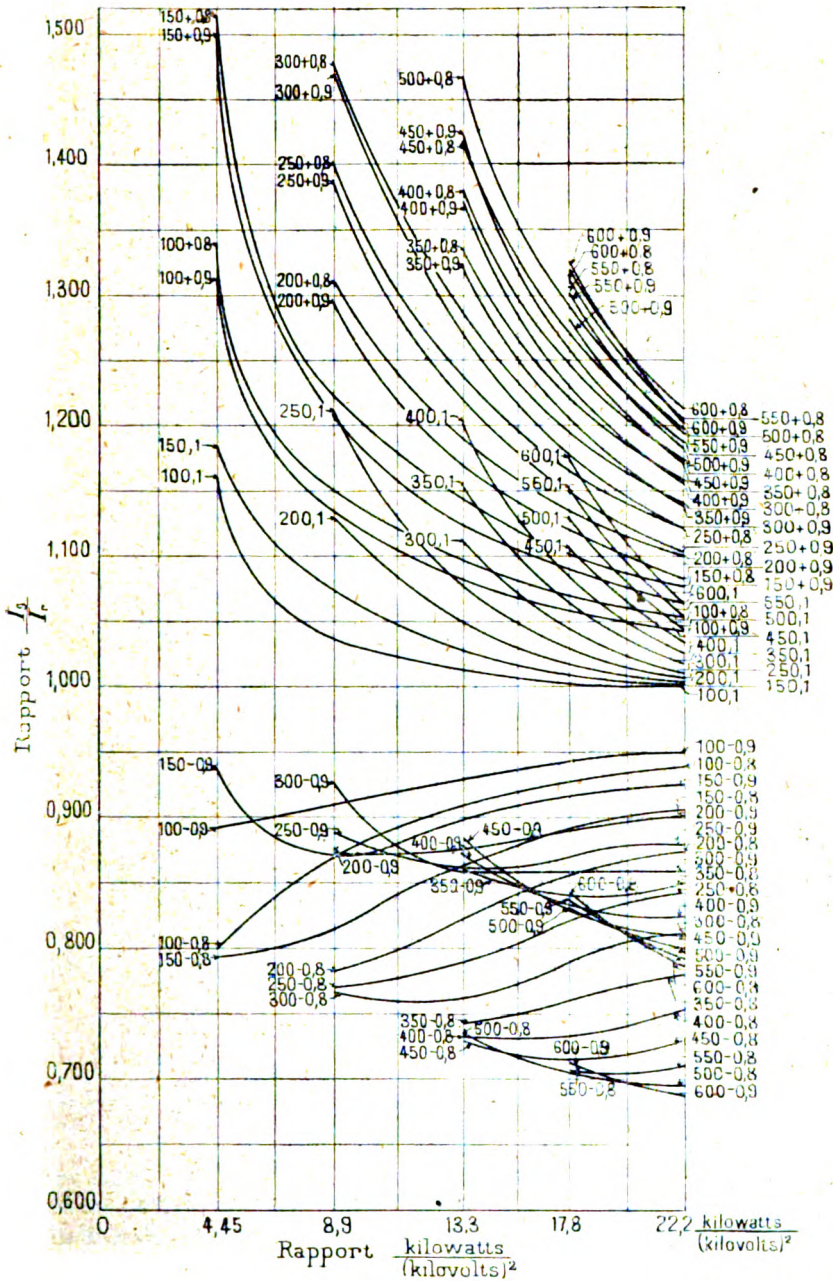


Fig. 12. — Valeurs du rapport $\frac{I_g}{I_r}$ en fonction du rapport $\frac{\text{kilowatts}}{(\text{kilovolts})^2}$ pour la ligne de transmission d'énergie (150 000 volts, 50 p : s) dont la résistance par km à 20° est 0,131 ohms et dont les conducteurs de 22,3 mm de diamètre sont disposés suivant un triangle équilatéral de 7,79 m de côté.

traction faite des transformateurs et appareils de régulation, sera de 5 800 mètres environ.

» Les 3 graphiques ci-joints donnent :

» — Le premier, la valeur du rapport $\frac{I_g}{I_r}$ des courants au départ et à l'arrivée (fig. 12) ;

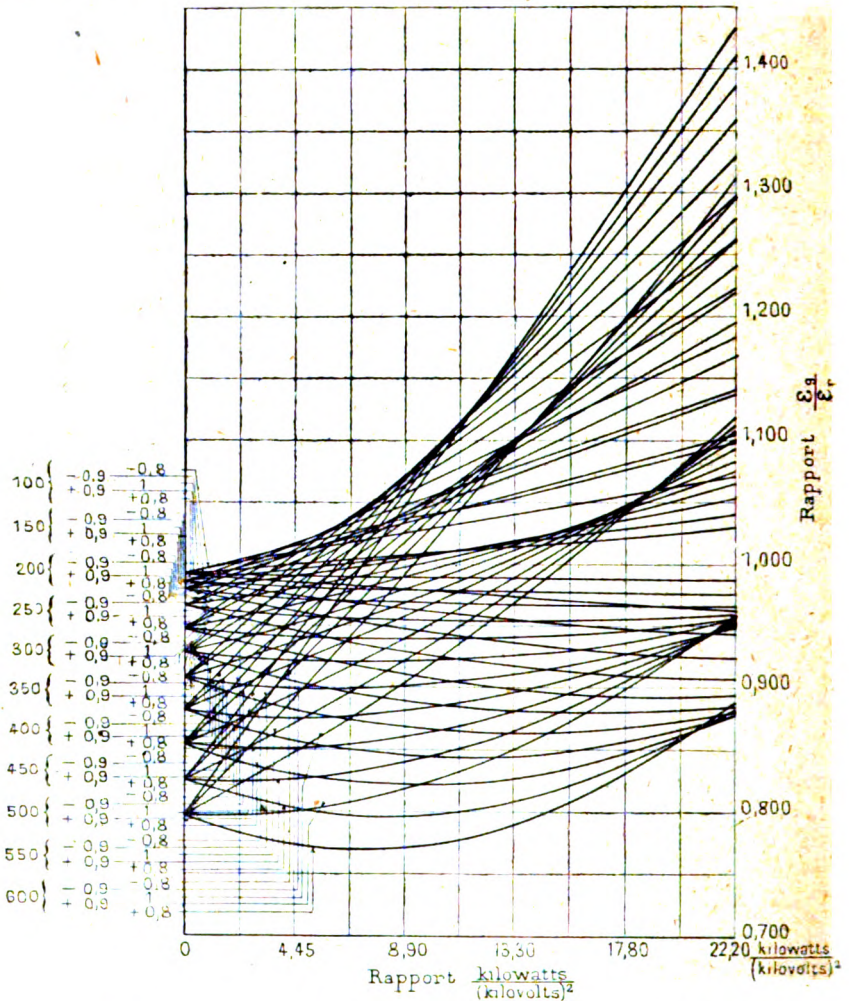


Fig. 13. — Valeurs du rapport $\frac{E_g}{E_r}$ en fonction du rapport $\frac{\text{kilowatts}}{(\text{kilovolts})^2}$ pour la ligne de transmission d'énergie (150 000 volts, 50 p : s) dont la résistance par kilomètre à 20° est 0,131 ohms et dont les conducteurs de 22,3 mm de diamètre sont disposés suivant un triangle équilatéral de 7,79 m de côté.

» — Le second, la valeur du rapport $\frac{E_g}{E_r}$ de la tension au départ et à l'arrivée (fig. 13) ;

» — Le troisième, la valeur $\cos \varphi_g$ du facteur de puissance au départ en fonction :

» a) Du rapport $\frac{P}{V^2}$ de la puissance reçue au carré de la tension à l'arrivée ;

b) De la distance de transmission de 50 en 50 kilomètres de 100 à 600 kilomètres ;

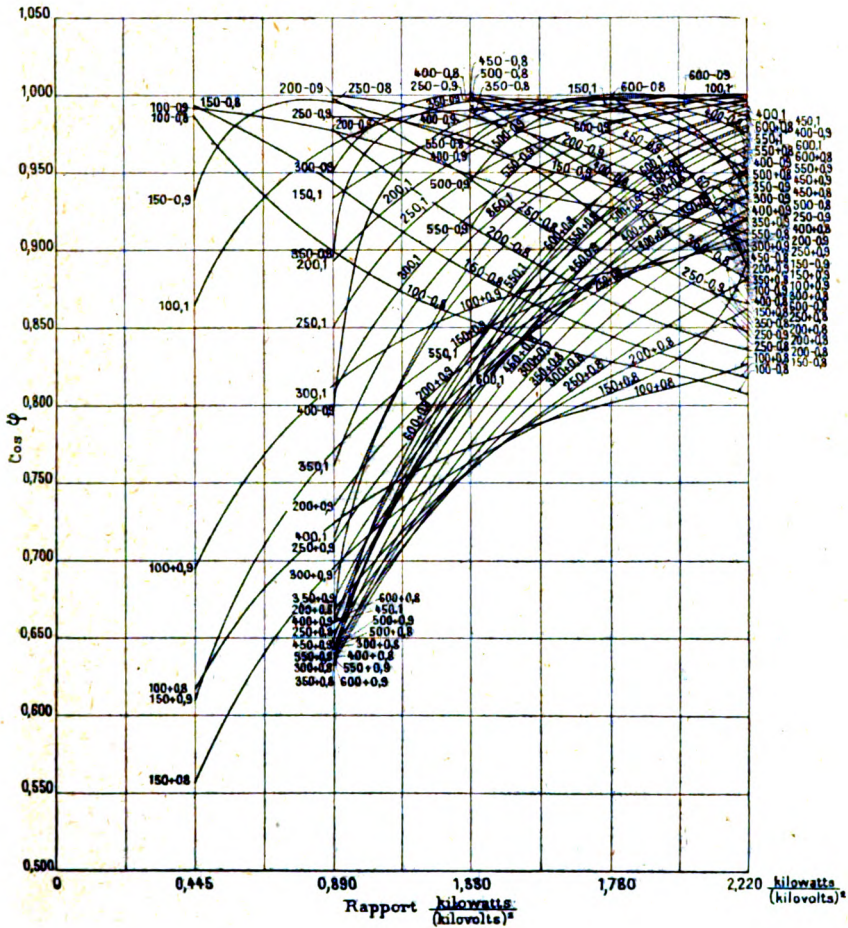


Fig. 14. — Valeurs du rapport $\cos \varphi_g$ en fonction du rapport $\frac{\text{kilowatts}}{(\text{kilovolts})^2}$ pour la ligne de transmission d'énergie (150 000 volts, 50 p : s) dont la résistance par kilomètre à 20° est 0,131 ohms et dont les conducteurs de 22,3 mm de diamètre sont disposés suivant un triangle équilatéral de 7,79 m de côté.

c) Du facteur de puissance $\cos \varphi$ de la charge à l'arrivée pour la valeur 1, 0,8 et 0,9 en avance, 0,9, 0,8 en retard (fig. 14).

» LIGNES A 90 KILOVOLTS. — Les lignes à 90 kilovolts seront constituées par 3 conducteurs d'aluminium à âme d'acier ayant chacun

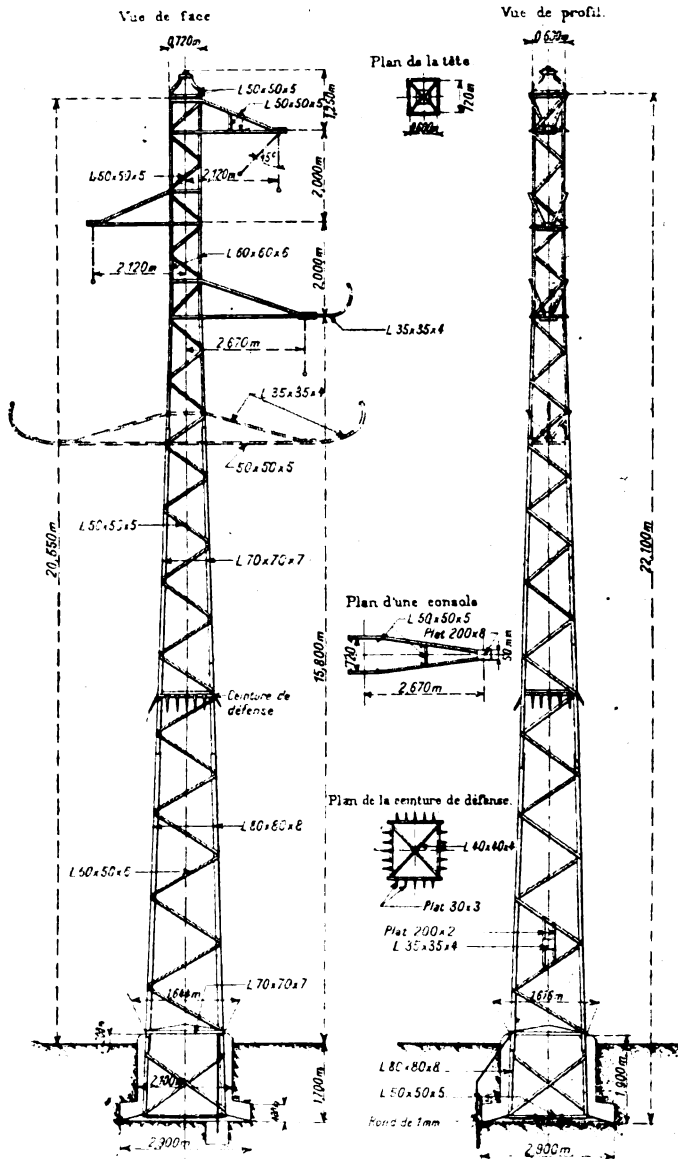


Fig. 15. — Vues en élévation d'un pylone d'alignement de la ligne à 90 000 volts.

une section totale de 238 mm² (section d'aluminium, 193 mm²) de 20,1 mm de diamètre.

» Ces conducteurs seront portés par des chaînes d'isolateurs du

type Hewlett (6 isolateurs en alignement, 7 aux ancrages) fixées à des pylônes métalliques de 22 mètres de hauteur encastrés d'en-

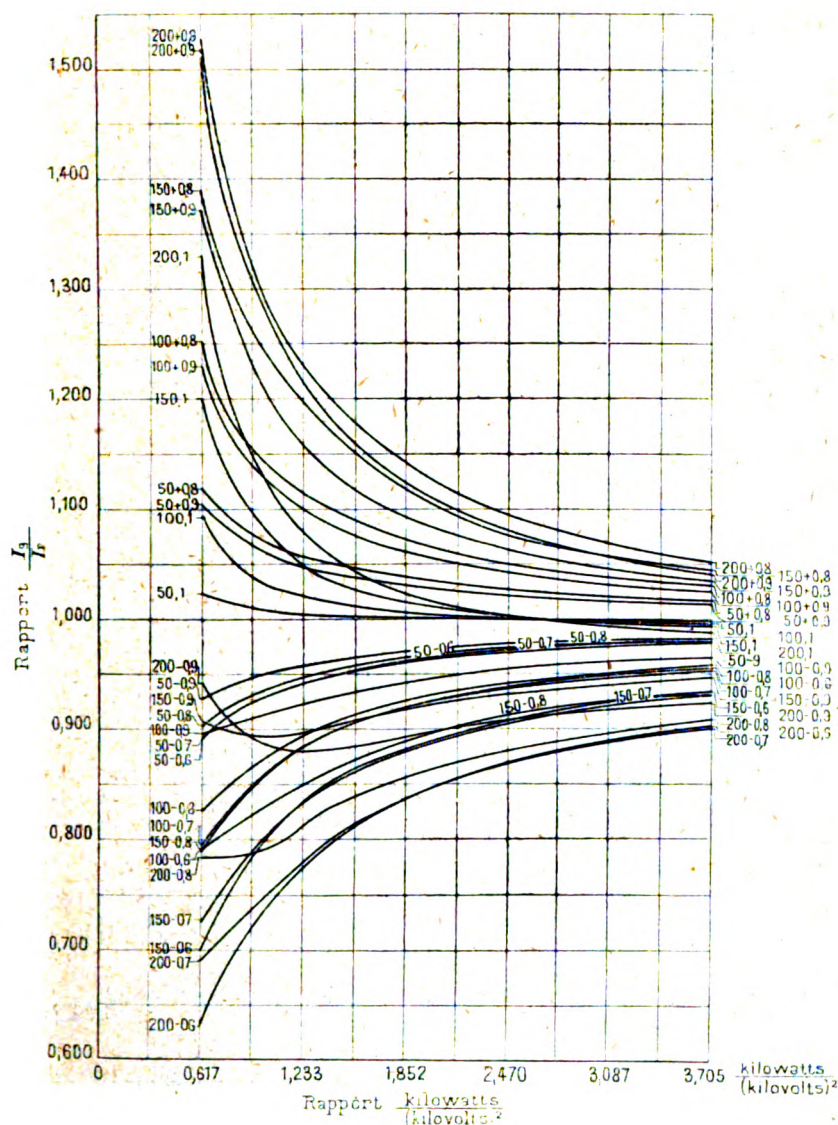


Fig. 16. — Valeurs du rapport $\frac{I_g}{I_r}$ pour différentes longueurs de lignes à 90 000 volts. Conducteurs aluminium-acier de 238 mm² (diamètre 20,1 mm) dont la disposition équivaut à un triangle équilatéral de 4,51 m de côté. — Résistance par kilomètre à 20° : 0,131 ohm.

viron 2 mètres dans le sol et espacés d'environ 225 mètres en moyenne ; les points d'attache des 3 chaînes d'isolateurs forment

un triangle dont les côtés auront respectivement comme longueur 4 m, 4,62 m et 5,08 m. (Ecartement équivalent $\sqrt[3]{dd'd''} = 4,51$ m).

» La hauteur du fil le plus bas au-dessus du sol au milieu de la portée sera d'environ 9 mètres.

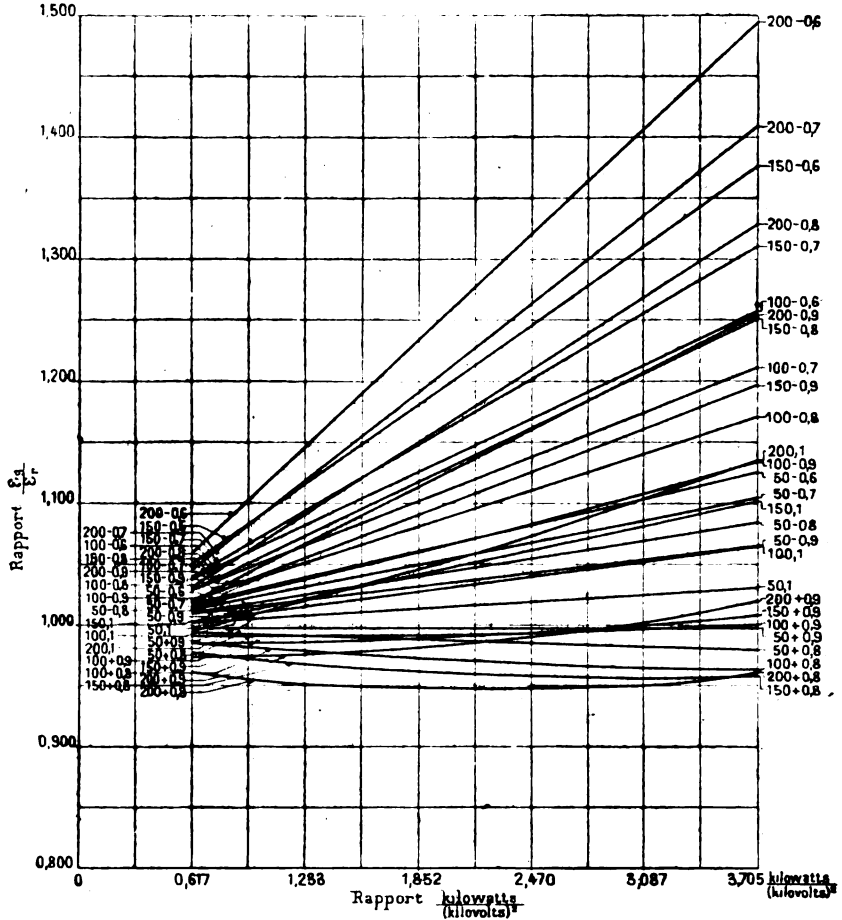


Fig. 17. — Valeurs du rapport $\frac{E_g}{E_r}$ pour différentes longueurs de lignes à 90 000 volts. Conducteurs aluminium-acier de 238 mm² (diamètre 20,1 mm) dont la disposition équivaut à un triangle équilatéral de 4,51 m de côté. — Résistance par kilomètre à 20° : 0,131 ohm.

» Un câble d'acier galvanisé de 60 mm² de section sera fixé à la tête du pylône et formera câble de terre.

» La figure 15 ci-contre représente le pylône d'alignement de la ligne à 90 kilovolts.

» Les constantes linéiques électriques de cette ligne sont pour

une température de 20° C et une fréquence de 50 périodes par seconde :

» $Z = 0,16 + j 0,40$ ohms par kilomètre.

» $Y = \quad + j 0,00000285$ mhos par kilomètre.

» La longueur d'onde propre de la ligne proprement dite, abstraction faite des transformateurs et appareils de régulation, est d'environ 5 770 mètres. Les trois graphiques ci-joints donnent :

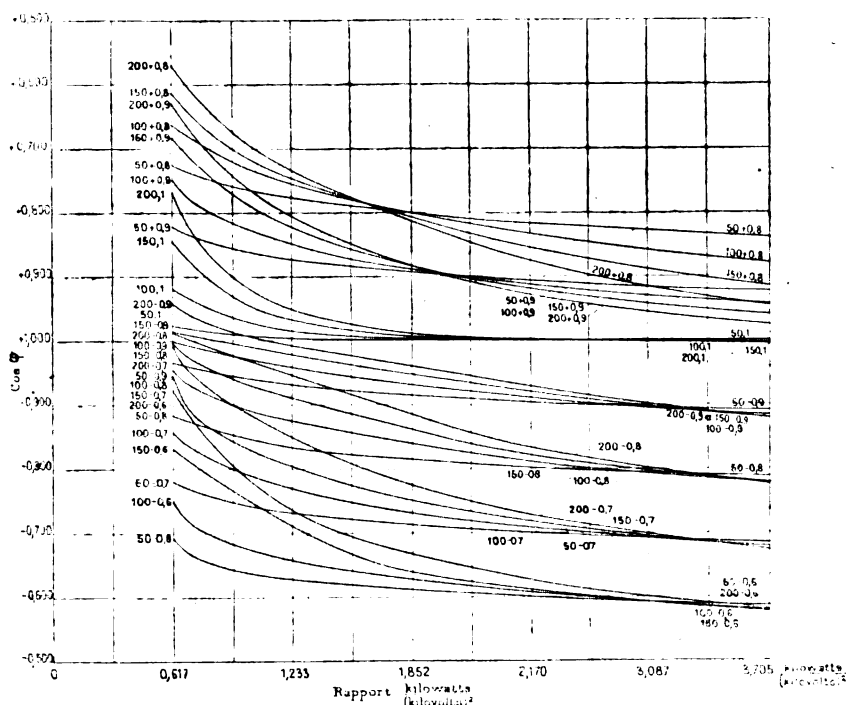


Fig. 18. — Valeurs du rapport $\cos \varphi_r$ pour différentes longueurs de lignes à 90 000 volts. Conducteurs aluminium-acier de 238 mm² (diamètre 20,1 mm) dont la disposition équivaut à un triangle équilatéral de 4,51 m de côté. — Résistance par kilomètre à 20° : 0,131 ohm.

» — Le premier, la valeur du rapport $\frac{I_s}{I_r}$ du courant au départ au courant à l'arrivée (fig. 16) ;

» — Le second, la valeur du rapport $\frac{E_s}{E_r}$ de la tension au départ à la tension à l'arrivée (fig. 17) ;

» — Le troisième, la valeur $\cos \varphi_r$ du facteur de puissance au départ, en fonction :

» a) Du rapport $\frac{P}{I^2}$ de la puissance reçue au carré de la tension à l'arrivée ;

» b) De la distance de transmission de 50 en 50 kilomètres de 50 à 200 kilomètres.

» c) Du facteur de puissance $\cos \varphi$ de la charge à l'arrivée pour la valeur 1, 0,9 et 0,8 en avance, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 en retard (fig. 18).

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

» La transformation du courant alternatif triphasé, 50 périodes par seconde, en courant continu à 1 500 volts, sera effectuée sur la section de Paris à Vierzon, dans 11 sous-stations comportant chacune un certain nombre de groupes de commutatrices hexaphasées à 750 volts, placées par deux en série.

» Ces groupes convertisseurs sont répartis dans les différentes sous-stations comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous :

Sous-stations	Tension d'alimentation volts	Puissance installée kilowatts	Puissance normalement en service kilowatts	Puissance maximum kilowatts
Paris.....	13 500	2 000 = 6 000	4 000	12 000
Ablon.....	13 500	2 000 = 6 000	4 000	12 000
St-Michel.....	90 000	2 000 = 6 000	4 000	12 000
Étrechy.....	90 000	2 000 = 6 000	4 000	12 000
Monnerville.....	90 000	2 000 = 4 000	2 000	6 000
Château-Gaillard.....	90 000	2 000 = 4 000	2 000	6 000
Les Aubrais.....	90 000	2 000 = 6 000	4 000	12 000
La Ferte.....	90 000	2 000 = 4 000	2 000	6 000
Nouan.....	90 000	2 000 = 4 000	2 000	6 000
Tneillay.....	90 000	2 000 = 4 000	2 000	6 000

» Chaque groupe de commutatrices sera susceptible de fournir une puissance de 2 000 kilowatts d'une façon continue, et de 3 000 kilowatts pendant 2 heures. Des surcharges de 200 pour 100, c'est-à-dire de 6 000 kilowatts pourront être imposées aux machines pendant une durée de l'ordre de 5 minutes. Les machines seront légèrement compoundées, de manière à participer au réglage de la tension dans certaines limites.

» Les deux sous-stations de Paris et d'Ablon alimentées à 13 500 volts par des câbles souterrains seront du type normal, tous les appareils étant renfermés dans des bâtiments couverts. Toutes les autres sous-stations alimentées par ligne aérienne à 90 000 volts seront du type extérieur, les transformateurs, disjoncteurs, etc... étant installés en plein air au-dessous d'une charpente métallique portant les barres omnibus, les sectionneurs et les connexions diverses.

La protection des installations sera assurée, du côté alternatif, par des interrupteurs à huile commandés par des relais à maximum et du côté continu, par des disjoncteurs à action ultra-rapide d'un type analogue à celui déjà employé sur le Chicago-Milwaukee and Saint-Paul Railway.

» Les commutatrices ont été spécialement étudiées de manière à donner du courant presque rigoureusement continu et ayant un facteur d'interférence téléphonique aussi faible que possible.

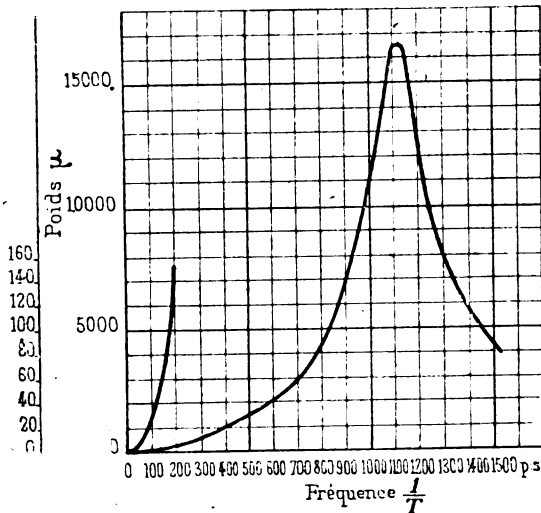
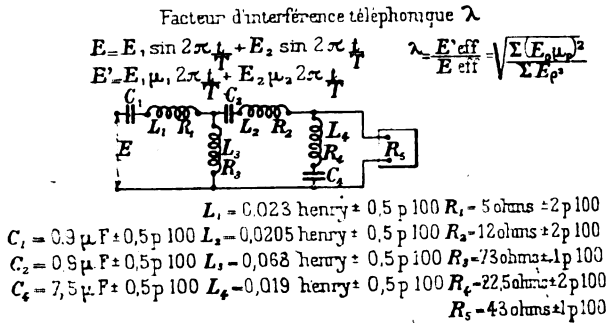


Fig. 19. — Variation de la sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence.

» A cet effet, le nombre des encoches et le nombre des pôles ont été calculés de manière que les courants parasites qui peuvent se produire aient, non seulement une tension très faible, mais encore des fréquences correspondant à des sons peu sensibles à l'oreille.

» *Remarque.* — La sensibilité de l'oreille humaine croît très

rapidement avec la fréquence, à peu près comme le carré de celle-ci jusque vers 800 périodes par seconde ; elle est maximum pour 1 100 p:s environ et elle décroît ensuite progressivement quand la fréquence augmente. La courbe ci-jointe permet de se rendre compte des variations de cette sensibilité (fig. 19).

» La sensibilité de l'oreille à une onde complexe semble pouvoir être considérée, en première approximation, comme proportionnelle à la racine carrée de la somme des carrés des vibrations élémentaires. Cette relation, qui n'est pas encore rigoureusement établie, permettrait de définir pour chaque forme d'onde ou de courant, un facteur dit d'interférence téléphonique.

» Si :

$$E = E_1 \sin 2\pi \frac{t}{T} + E_2 \sin 4\pi \frac{t}{T} + \dots$$

représente, par exemple, l'onde de tension, tout se passerait comme si une oreille, également sensible à toutes les fréquences, recevait une onde :

$$E = E_1 \varphi_1 \sin 2\pi \frac{t}{T} + E_2 \varphi_2 \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

» Le facteur d'influence téléphonique serait alors défini par le rapport des tensions efficaces E'_{eff} et E_{eff} .

$$\lambda = \frac{E'_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \sqrt{\frac{\sum (E_n \varphi_n)^2}{\sum E_n^2}}.$$

» Au lieu de procéder à l'analyse harmonique de l'onde E et d'effectuer les calculs compliqués correspondant à la définition même de λ , on peut procéder expérimentalement en mesurant l'intensité qui circule dans l'ampèremètre thermique de résistance R_s , quand on applique aux bornes du système de circuits représenté sur la figure, la force électromotrice E . Les valeurs des capacités, des réactances et des résistances indiquées sur la figure ont été calculées de manière à obtenir aux bornes de la résistance R_s , la force électromotrice E' .

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

» Pour la tension de 1 500 volts en courant continu, on peut employer indifféremment comme conducteur d'alimentation le troisième rail ou la ligne aérienne. Avec le troisième rail, certaines précautions doivent cependant être prises pour éviter de couper

le courant en pleine marche, au passage des interruptions inévitables du rail de contact.

» Il résulte des essais que nous avons fait faire aux Etats-Unis sur la voie d'essai de la General Electric C^o à Erié, que, pour de faibles vitesses comme pour les fortes intensités, l'arc, produit au moment de la rupture du courant par le frotteur, s'amorçait entre le troisième rail et la masse de la machine produisant un court-circuit et provoquant un déclanchement général.

» On peut, pour éviter la rupture du courant, augmenter l'écartement entre frotteurs en plaçant, par exemple, comme l'ont fait certains chemins de fer anglais pour des installations à 1 200 volts, un câble de jonction tout le long du train de manière à pouvoir alimenter une automotrice quelconque par des frotteurs placés en tête ou en queue de la rame; on peut aussi assurer la continuité de l'alimentation en plaçant des éléments de ligne aérienne au-dessus des coupures de troisième rail.

» Pour une ligne comme celle de Paris à Orléans, qui sera vraisemblablement à quadruple voie dans toute sa longueur dans un avenir assez rapproché et où existent plus de 100 coupures du troisième rail sur chaque voie, il a paru plus simple et plus sûr d'installer une ligne aérienne continue. Toutefois, pour réduire au minimum les conséquences d'incidents ou d'accidents aux lignes aériennes dans une section aussi importante du réseau, on a prévu, dans l'entrevoie médiane, deux troisièmes rails servant de feeders, pouvant aussi servir de ligne de contact en cas de besoin pour les deux voies centrales.

» Les voies centrales qui sont parcourues normalement par des trains rapides dont la vitesse dépend presque exclusivement de la tension moyenne d'alimentation, doivent avoir une très bonne conductibilité pour marcher à tension à peu près constante. Les voies latérales qui ne sont parcourues que par des trains de banlieue ou des omnibus à faible vitesse et des trains de marchandises pour lesquels on n'a besoin de réaliser que de grands efforts de traction, peuvent avoir une conductibilité relativement faible. Avec la disposition employée, la résistance linéique moyenne d'une voie centrale isolée sera d'environ 0,033 ohm:km; celle d'une voie latérale, d'environ 0,06 ohm:km.

» En principe, on constituera, dans l'intervalle de deux sous-stations, deux réseaux de distribution distincts constitués: l'un par les voies centrales, l'autre par les voies latérales.

» Les résistances moyennes de ces circuits seront respectivement 0,016 et 0,03 ohm par kilomètre.

» Il y a lieu de noter que la disposition adoptée permettrait éventuellement de passer sur les voies centrales de la distribution ordinaire à 1 500 volts à une distribution à 3 fils $\pm$ 1 500 volts analogue à celle du chemin de fer Nord-Sud.

» TROISIÈME RAIL. — Le troisième rail qui sera installé sur les voies centrales a une forme particulière, étudiée en vue d'améliorer la captation du courant ; alors que, dans les troisièmes rails

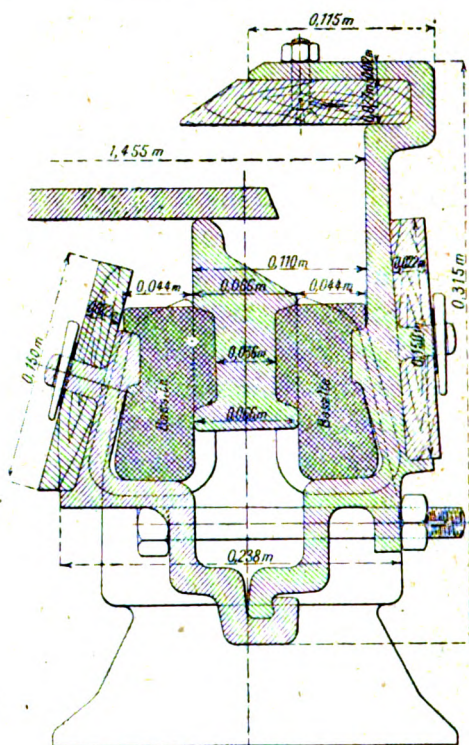


Fig. 20. — Projet de 3^e rail et sa protection

actuellement en service, on essaie d'obtenir un bon contact en faisant glisser deux surfaces l'une sur l'autre, dans le système actuel on essaie d'atteindre le même but en faisant glisser une surface sur une ligne : frotteurs à palettes multiples glissant sur un conducteur mince et arrondi.

» Il est facile de constater que, dans le cas du glissement de deux surfaces l'une sur l'autre, le point de contact électrique ne coïncide pas à chaque instant avec le point de contact mécanique,

du fait des irrégularités inévitables des surfaces. Il en résulte une production continue d'arcs plus ou moins violents entre frotteur et rail.

» Le contact obtenu avec la forme nouvelle semble devoir être meilleur et être tout à fait analogue à celui réalisé sur une ligne aérienne avec archets à contacts multiples.

» Pendant l'hiver, le grattage mécanique du verglas pourra s'effectuer plus aisément avec les rails de forme nouvelle, qu'avec des rails de forme ordinaire, le dépôt de la glace étant moins adhérent et plus fragile.

» Le dessin de la figure 20 ci-joint représente le mode de montage adopté pour un troisième rail de 42 kg par mètre (5 400 mm² de section environ), ainsi que le dispositif de protection prévu pour éviter, le cas échéant, les contacts accidentels.

» Le métal constituant le rail est de l'acier doux contenant moins de 0,3 pour 100 de manganèse et 0,04 pour 100 de phosphore ; sa résistivité est d'environ 7,5 fois plus élevée que celle du cuivre ; sa résistance mécanique à la rupture est de 38 kg : mm² ; son allongement, 27 pour 100.

» La résistance linéique moyenne d'un tel troisième rail composé de tronçons de 18 mètres sera d'environ 0,022 ohm par kilomètre.

» LIGNES AÉRIENNES. — Les lignes aériennes installées au-dessus des voies principales seront du type à suspension caténaire compound à double fil de contact ; elles ont été spécialement étudiées pour permettre la captation de fortes intensités à grandes vitesses ; elles ont été prévues entièrement en métal non ferreux en vue de réduire au minimum les effets de la corrosion par les gaz électrisés qui s'échappent des foyers des locomotives à vapeur. Etant donné que, sur toutes les lignes dont l'électrification est décidée, il faudra assurer pendant un temps assez long une exploitation mixte électrique et à vapeur, il est nécessaire de prendre toutes les précautions susceptibles d'éviter toute détérioration systématique de la ligne de contact avant que la substitution de l'électricité à la vapeur soit complète.

» Chaque ligne caténaire comprendra essentiellement :

» Un câble porteur en bronze téléphonique de 116 mm² de section (37 fils de 2 mm) ayant une résistance mécanique à la rupture d'environ 60 kg : mm² (soit un effort total de 7 000 kg envi-

ron) et une résistivité d'environ 25 microhms-centimètre ;

» Un fil auxiliaire en cuivre électrolytique de 104 mm^2 de section, ayant une résistance mécanique à la rupture d'environ $36 \text{ kg} : \text{mm}^2$ ($3\,750 \text{ kg}$ environ) ;

» Deux fils de contact rainurés en cuivre de 107 mm^2 de section.

» Les fils de contact seront suspendus au porteur auxiliaire par des pendules alternés suivant une disposition déjà employée au Chicago-Milwaukee-St-Paul et proposée, croyons-nous, pour la première fois, par M. de Kando.

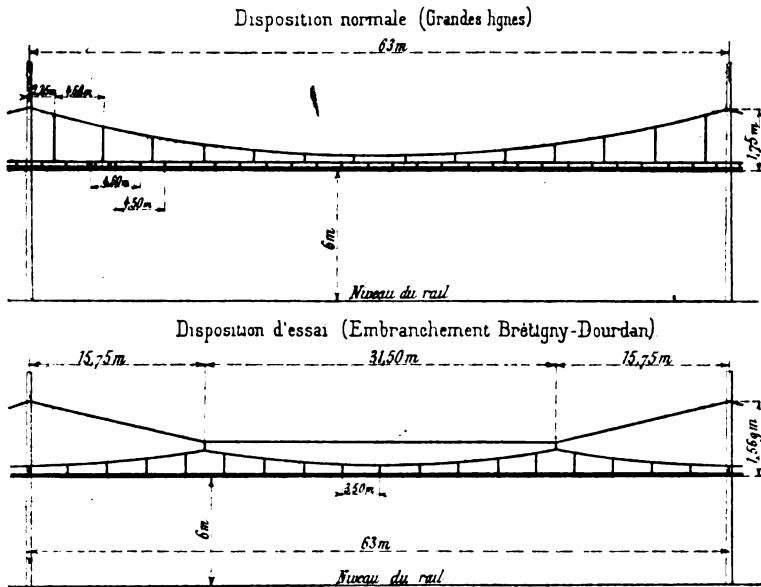


Fig. 21. — Electrification de la ligne de Paris à Brive, suspension caténaire. Type A : disposition normale ; type B disposition d'essai.

» Cet ensemble de fils, d'une section totale de 434 mm^2 , présente une conductibilité égale à celle de 400 mm^2 de cuivre électrolytique, soit environ $0,042 \text{ ohm}$ par kilomètre.

» Des expériences effectuées à Juvisy et à Brétigny sur plusieurs portées de 90 et 63 mètres de ligne caténaire des deux types représentés sur la figure 21, nous ont montré que la flexibilité, bien que plus régulière sur le type B que sur le type A, était, à tension égale des fils de contact, plus grande sur B que sur A.

» L'effet du vent est sensiblement le même sur les deux caténaires, que celles-ci pèsent $6,5 \text{ kg}$ au mètre courant pour des portées de 90 mètres, ou $4,5 \text{ kg}$ pour des portées de 63 mètres.

» C'est cette dernière valeur de la portée en alignement droit

qui a été choisie, car elle permet, tout en construisant une ligne relativement légère, de ne pas avoir de désaxement dangereux pour la tenue des pantographes en cas de vents transversaux

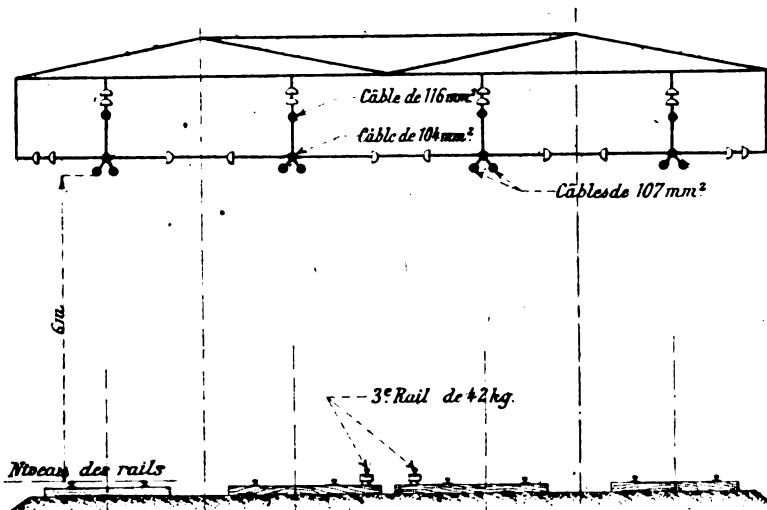


Fig. 22a. — Equipement d'une voie quadruple.

violents. Les lignes de contact seront montées de manière que leurs points d'attache s'écartent de ± 10 centimètres de l'axe de la voie en alignement toutes les 3 portées, et que le désaxement maximum en courbe ne dépasse pas 20 centimètres au droit des supports, 10 centimètres au milieu des portées.

» La figure 22 a montré la disposition générale adoptée pour les sections de ligne à 4 voies avec ligne caténaire au dessus des 4 voies et 3^e rail-feeder dans l'entrevoie centrale.

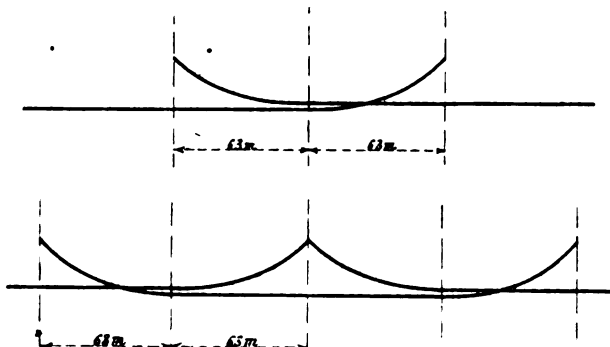


Fig. 22b. — Sectionnement normal à lame d'air. — Sectionnement avec zone neutre

» SECTIONNEMENT DES LIGNES DE CONTACT. — Les lignes de contact seront sectionnées au droit de chaque sous-station, la cou-

pure étant réalisée avec ou sans zone neutre suivant les cas ; comme il est indiqué sur la figure 22 (b), chaque feeder de jonction sera protégé par un disjoncteur ultra-rapide et des couteaux d'isolement.

» D'autres sectionnements automatiques à simple lame d'air sans zone neutre seront prévus entre sous-stations à raison d'au moins un par intervalle. Ces sectionnements intermédiaires seront placés, sauf impossibilité, au droit des sémaphores, de façon à éviter qu'une machine ayant son pantographe en prise ne fasse déclancher les disjoncteurs de protection en passant d'une section sous tension à une autre mise à la terre.

» Des postes de mise en parallèle automatique seront de plus établis tous les 4 kilomètres en moyenne, ces postes servant d'ailleurs de poste d'alimentation de voies secondaires s'il y a lieu.

» Les postes de sectionnement et de mise en parallèle seront tous munis de disjoncteurs ultrarapides, réglés de manière à assurer l'isolement immédiat d'une section de ligne avariée et de celle-là seulement.

» Ces disjoncteurs seront commandés électriquement à distance à partir de la sous-station ou du poste sémaphorique le plus voisin et les positions d'ouverture et de fermeture de ces disjoncteurs seront contrôlées dans leurs postes de commande respectifs, au moyen de lampes témoin.

» Des boutons d'alarme, espacés de 300 mètres environ et placés le long des voies, permettront de déclancher à la fois tous les disjoncteurs alimentant ou sectionnant une voie déterminée. Ils actionneront en même temps, dans les sous-stations ou postes sémaphoriques intéressés, un signal d'alarme avertissant le personnel de l'existence d'une disjonction sur les voies.

» En principe, ces signaux d'alarme ne pourront être mis en action qu'en cas d'accident, par les agents des trains.

UTILISATION DE L'ÉNERGIE

MATÉRIEL ROULANT. — Le matériel roulant actuellement commandé pour la réalisation d'une partie de la première étape d'électrification comprend :

- » 80 automotrices pour le service de banlieue,
- » 200 locomotives de marchandises et de manœuvres,
- » 5 locomotives d'essai à grande vitesse.

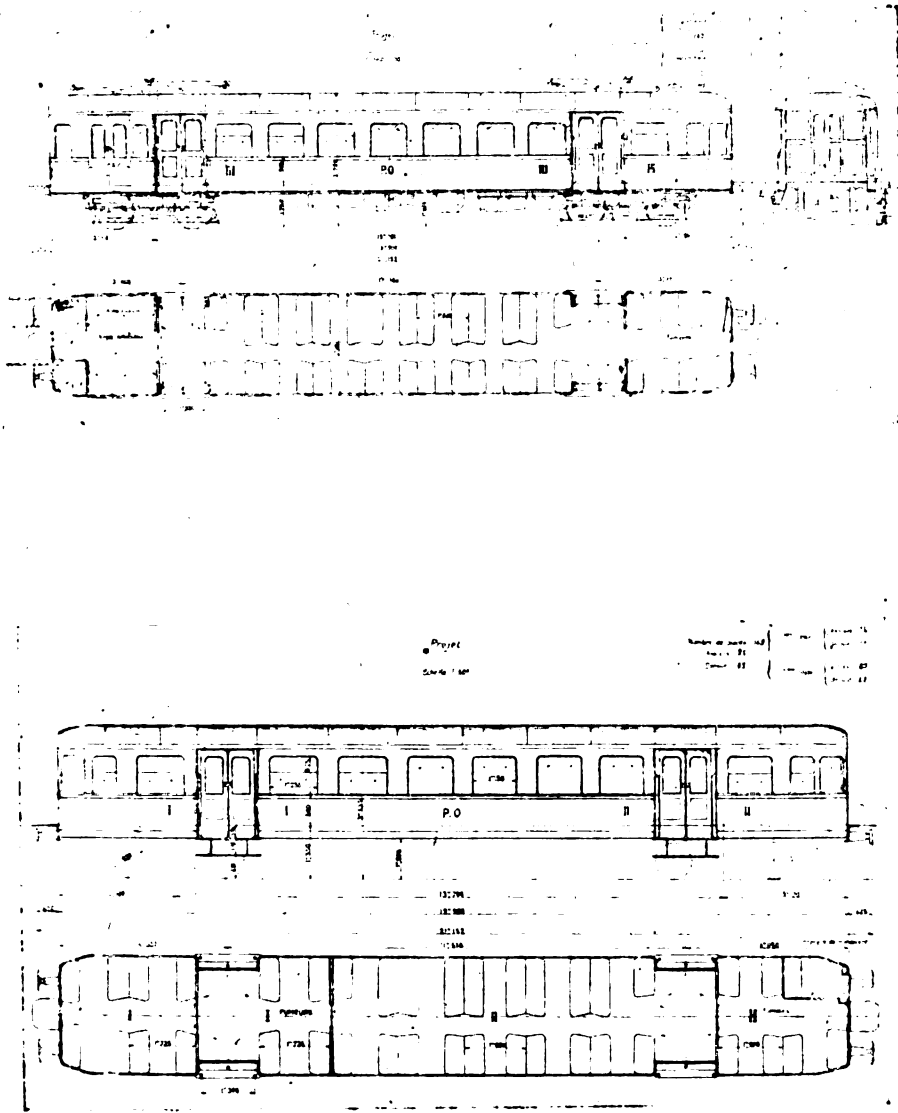


Fig. A. — Trains de banlieue. — Voiture automotrice électrique. — Voiture remorque mixte de 1^{re} et 2^e classe. — Voiture remorque de 3^e classe. — Projet.

» Les locomotives à grande vitesse sont destinées, en principe, à remorquer tous les trains de voyageurs devant circuler à une vitesse nominale supérieure à 65 kilomètres par heure. Un certain nombre de locomotives de marchandises et les automotrices assureront la remorque des trains de voyageurs devant circuler à une vitesse inférieure à 65 kilomètres par heure.

» 1° *Trains automoteurs.* — Le service de banlieue sera assuré sur la grande ligne, au départ de Paris, au moyen de rames automotrices constituées par un nombre variable d'unités (1, 2 ou 3 unités par train), comprenant chacune 1 automotrice d'environ 62 tonnes et 2 remorques montées sur 2 bogies à 2 essieux, pesant chacune environ 32 tonnes.

» Les voitures d'une même unité seront accouplées d'une façon fixe par des attelages centraux très courts, ne laissant entre les caisses de 2 voitures voisines qu'un intervalle d'environ 0,5 mètre.

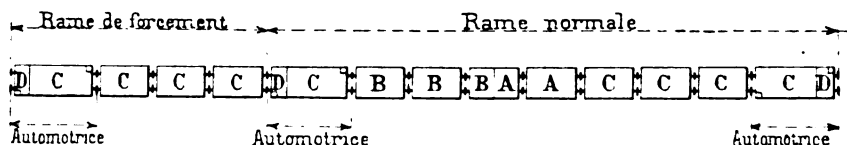


Fig. B. — Schéma des rames de trains de banlieue (période transitoire)

La longueur entre tampons d'une unité complète sera, dans ces conditions, d'environ 62 mètres. Le train de composition maximum formé de 3 unités aura donc 186 mètres de longueur.

» Le nombre de places assises, offertes dans chaque unité est de :

1 ^{re} classe	32
2 ^e classe	52
3 ^e classe ,	182

266

» A titre provisoire, il sera constitué des rames automotrices avec des automotrices nouvelles et des voitures de remorque d'ancien modèle, à 2 essieux à portières latérales.

» Ces trains automoteurs seront constitués par une rame normale comprenant 2 automotrices et 7 remorques et une rame de forçement comprenant 1 automotrice et 3 voitures de remorque.

» Le schéma B, ci-joint, représente la disposition de ces rames.

» Pendant la journée, la rame normale sera seule en circulation et aux heures d'affluence sa capacité en voyageurs sera augmentée par addition de la rame de forçement.

» Equipement électrique des automotrices. — Chaque automotrice sera munie de 4 moteurs à 750 volts, placés par deux en

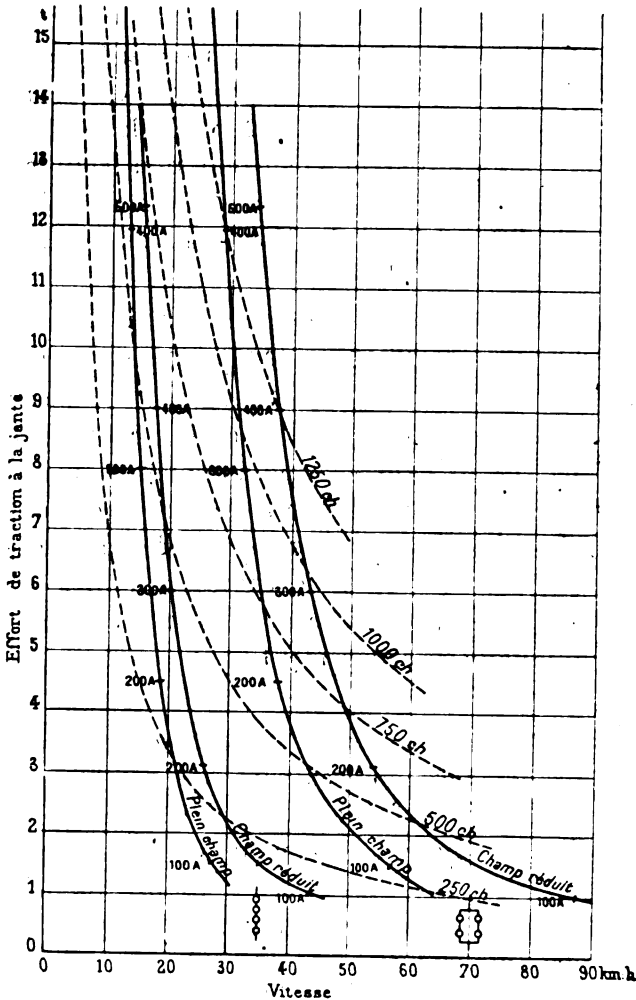


Fig. 23. — Automotrice P. O. (4 moteurs GEZ-903). — Efforts de traction à la jante pour les régimes de marche économique à 1 350 volts à plein champ et à champ réduit. — Courbes d'équipuissance. — Rapport de réduction de l'engrenage 70/21. — Diamètre des roues motrices 1 100 mm.

série, ayant chacun, à 675 volts, une puissance pendant une heure de 235 chevaux et continue de 167 chevaux.

» Chaque moteur sera à self-ventilation et, étant complètement

isolé au mica, il pourra supporter sans inconvénient des échauffements au-dessus de la température ambiante de 120° C.

» La puissance continue indiquée ci-dessus correspond à cet échauffement de 120° C.

» Les moteurs actionneront par engrenage unique les essieux de chaque bogie.

» Les automotrices seront munies d'un système de train control électropneumatique analogue à celui employé actuellement sur le chemin de fer métropolitain de New-York. Ces équipements sont beaucoup plus légers et beaucoup plus simples que ceux en usage sur les automotrices de la Compagnie d'Orléans, des Compagnies de l'Ouest-Etat, du Nord-Sud ou du Métropolitain de Paris.

» Ils ont été spécialement étudiés pour fonctionner à 1 500 volts, tout l'équipement de commande étant suspendu sous les caisses.

» Sur la figure 23, on a représenté les courbes caractéristiques de fonctionnement des moteurs en question, courbes donnant, en fonction de la vitesse exprimée en kilomètres par heure, les efforts de traction à la jante pour la tension moyenne d'alimentation de 1 350 volts. Ces courbes sont cotées en ampères et les puissances unihoraire et continue correspondant à un échauffement de 120° C après une heure de marche ou après la marche continue sont indiquées séparément.

» 2° *Locomotives de trains de marchandises.* — Les locomotives de trains de marchandises sont des machines à 2 bogies moteurs, d'un type tout à fait analogue à celles en service depuis 20 ans sur la ligne de Paris à Juvisy ou des Invalides à Versailles. Chaque bogie est muni de deux essieux de traction du type « cuirassé », chaque moteur attaquant, par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenage unique, un essieu du bogie.

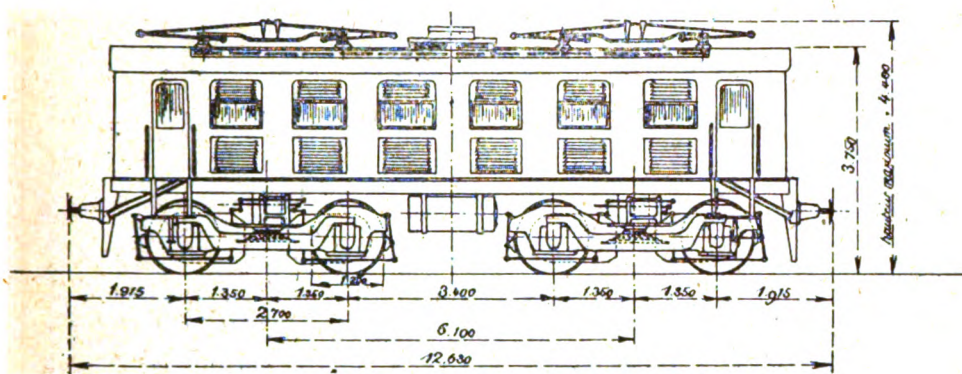
» Le dessin ci-contre donne les silhouettes des locomotives qui ont été commandées à différents constructeurs, savoir :

» Fig. C. — 80 locomotives (Sté d'Etudes pour l'Electrification des Chemins de fer français).

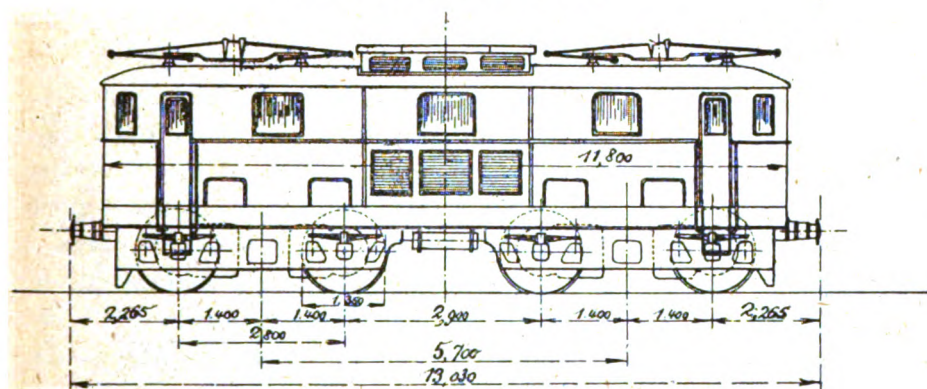
» Fig. D. — 40 locomotives (Sté alsacienne de Constructions mécaniques de France).

» Fig. E. — 80 locomotives (Sté des Batignolles-Oerlikon).

Société d'Etudes



Société Alsacienne



Société des Batignolles.

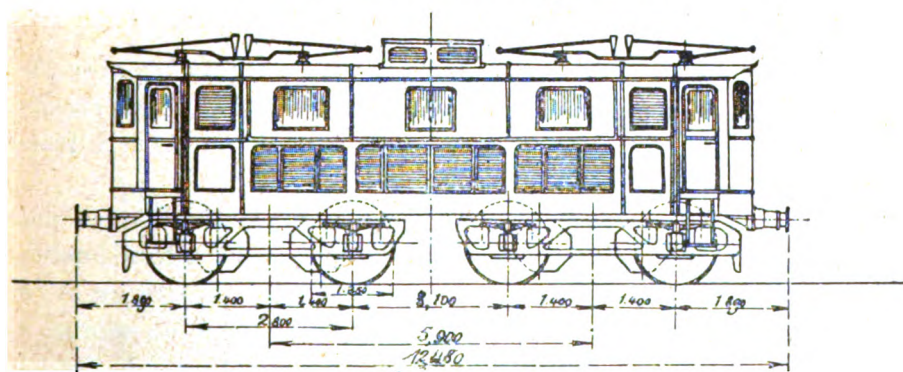


Fig. C-D-E. — Locomotives pour trains de marchandises.

» Les caractéristiques principales de ces locomotives sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

	Société d'Etudes	Ateliers Batignolles- Oerlikon	Société alsacienne de Constructions mécaniques
Longueur entre tampons.....	12,630 m	12,480 m	13,030 m
Longueur totale de la caisse.....	11,100 m	11,336 m	11,800 m
Largeur totale de la caisse.....	3 m	3,050 m	3 m
Empattement total.....	8,800 m	8,700 m	8,300 m
» rigide.....	2,700 m	2,800 m	2,800 m
Distance entre pivots de bogies.....	6,100 m	5,900 m	5,700 m
Diamètre des roues motrices.....	1,250 m	1,350 m	1,350 m
Poids total.....	64 tonnes	64 tonnes	64 tonnes
Poids adhérent.....	64 tonnes	64 tonnes	64 tonnes
Puissance pendant une heure.....	1 400 chevaux	1 720 chevaux	1 500 chevaux
Puissance continue.....	1 200 chevaux	1 320 chevaux	1 200 chevaux

» Ces machines sont susceptibles de remorquer des trains de marchandises de 1 000 tonnes, à la vitesse nominale de 40 kilomètres par heure, et des trains de voyageurs de 500 tonnes à la vitesse nominale de 65 kilomètres par heure.

» Pour le moment, à titre provisoire, on n'a fait aucune distinction entre les locomotives de trains de marchandises et les locomotives de manœuvres. Un certain nombre de machines des types spécifiés ci-dessus seront employées provisoirement pour effectuer la formation et le triage des trains dans les gares.

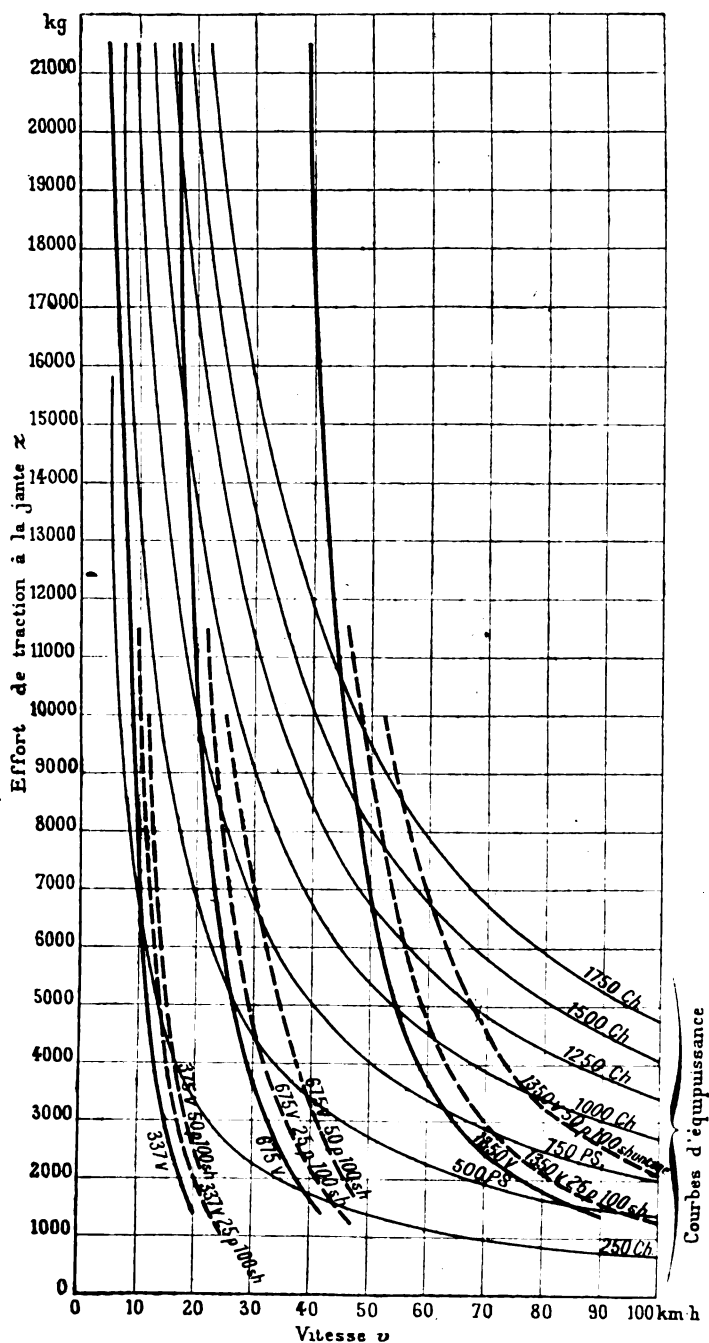
» Les locomotives à 600 volts actuellement en service sur la ligne de Paris à Juvisy, seront transformées en machines à 1 500 volts de manœuvre, par addition de groupes moteurs-générateurs.

» 3° *Locomotives à grande vitesse.* — Pour les locomotives à grande vitesse, il ne pouvait être question de commander immédiatement des machines en grande série et il était nécessaire de procéder à des essais.

» Il n'existe, en effet, dans aucune des électrifications actuellement réalisées, de machines à voyageurs assurant un service comparable à celui des machines à vapeur à grande vitesse françaises.

» Ni en Suisse, ni en Italie, ni en Allemagne, ni en Amérique, on n'assure de service de voyageurs réguliers à des vitesses nominales supérieures à 75 kilomètres par heure. En Amérique et en Italie, on fait fonctionner de temps en temps, mais en somme à titre exceptionnel, certaines locomotives à des vitesses de l'ordre de 100 kilomètres par heure.

» Sur le Chicago-Milwaukee and St-Paul Railway, nous avons pu cependant procéder, avec une locomotive « gearless » de la



General Electric C°, à des essais de marche, locomotive seule, à la vitesse de 130 km : h entre Tacoma et Scattle pendant quelques instants.

» Mais il ne s'agit là que de parcours exceptionnels, et non pas de marche de service.

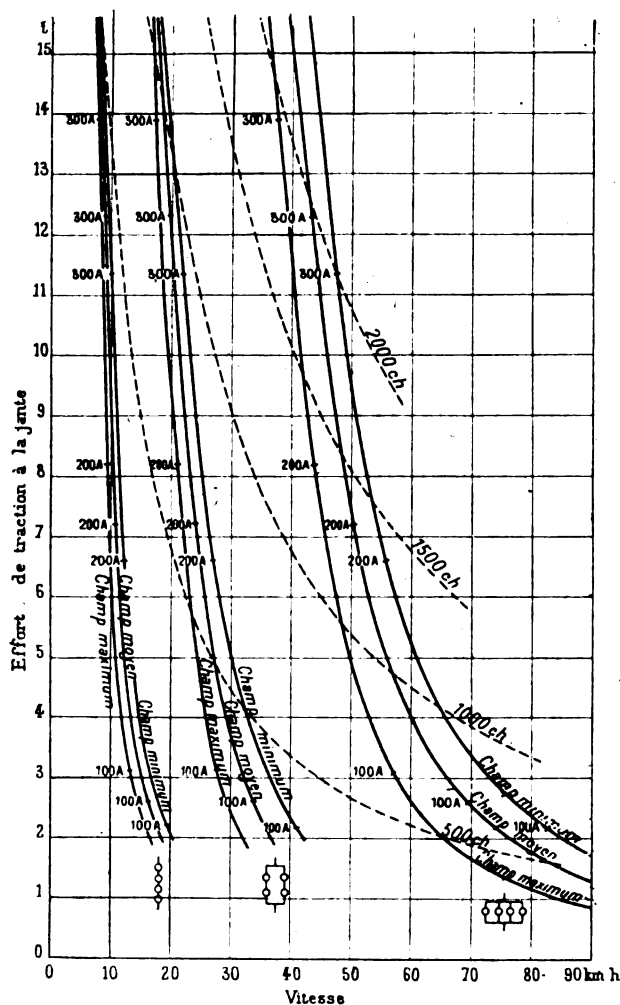


Fig. II. — Locomotive P.-O. pour trains de marchandises (4 moteurs C-E-Z 907). — Efforts de traction à la jante pour les régimes de marche économique à 1 350 volts à plein champ et à champ réduit. — Courbes d'équipuissance. — Rapport de réduction de l'engrenage 65/21, diamètre des roues motrices 1 250 mm.

» Il faut bien reconnaître, d'ailleurs, que l'expérience acquise avec la vapeur ne nous renseigne que très imparfaitement sur les meilleures dispositions à adopter. Le problème est essentiellement différent, tant en ce qui concerne le mode de transmis-

sion de l'effort aux essieux, qu'en ce qui concerne la construction de la partie mécanique proprement dite et notamment des trains roulants.

» Nous allons examiner successivement, pour les 5 machines d'essai qui vont être commandées, le système de transmission de l'effort moteur aux roues motrices et la constitution des trains roulants.

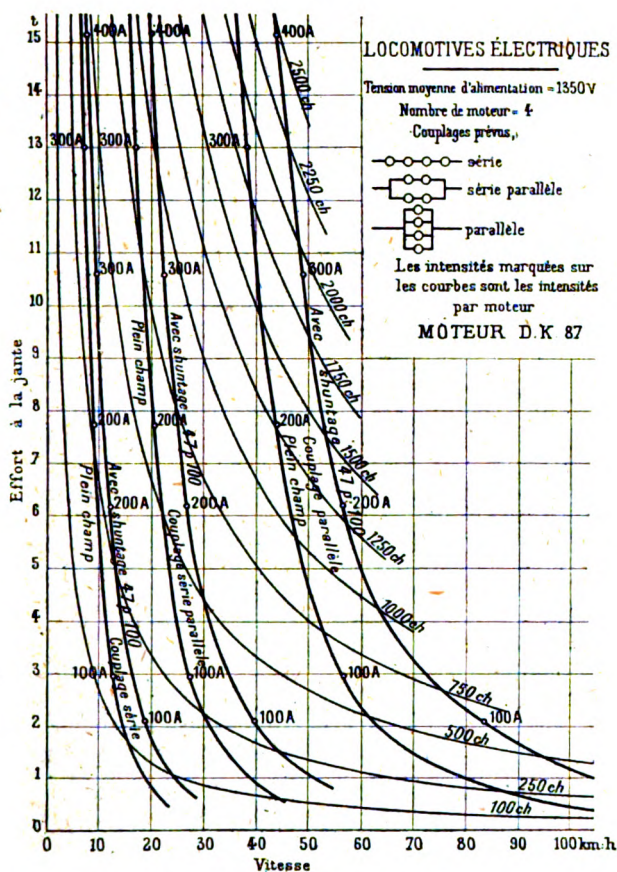


Fig. III. — Locomotive des Constructions électriques de France pour trains de marchandises. — Courbes des efforts de traction à la jante en fonction des vitesses.

» SYSTÈMES DE TRANSMISSION. — En ce qui concerne les systèmes de transmission, les trois principaux jusqu'ici qui aient été étudiés sont :

- » A. L'attaque directe,
- » B. L'attaque par engrenages,
- » C. L'attaque par bielles.

» Et nous nous proposons d'expérimenter chacun d'eux.

» 1° *Attaque directe.* — L'attaque directe est de beaucoup la plus simple, puisqu'elle n'exige aucun organe intermédiaire et que les induits sont calés directement sur les essieux.

» Avec la traction à courant continu, il est possible de construire des moteurs bipolaires dont l'induit est calé directement sur l'essieu, tandis que les inducteurs sont solidaires du châssis et sont, par conséquent, suspendus. Bien que l'induit puisse prendre par rapport aux inducteurs, non seulement le mouvement de rotation normale, mais encore des mouvements oscillatoires du fait des inégalités de la voie, la commutation de ces moteurs reste suffisamment bonne pour qu'ils puissent assurer un service régulier, très satisfaisant.

» L'examen des collecteurs des moteurs des locomotives « gearless » du New-York-Central et du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul Railway donne à ce sujet tout apaisement.

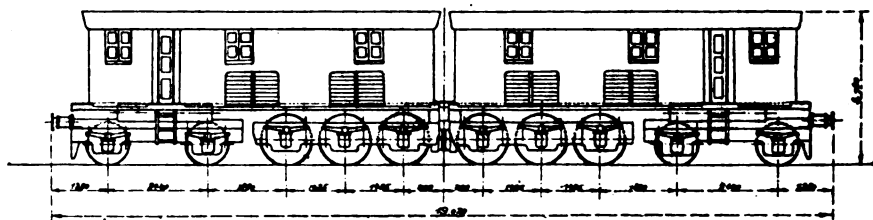


Fig. F. — Locomotive gearless de la G. E. C°

» Nous avons donc commandé à la Société d'Etudes pour l'Electrification des Chemins de fer français une locomotive « gearless » construite suivant les mêmes principes que celles des installations américaines précitées (fig. F).

» Cette locomotive articulée du type 2C+C2 sera munie de 6 moteurs bipolaires à 750 volts d'une puissance unihoraire de 400 chevaux et d'une puissance continue de 350 chevaux.

» Ces moteurs, bobinés chacun pour la tension de 750 volts, pourront fonctionner, soit par 6 en série, soit par 3 en série, soit par 2 en série ; à un effort de traction quelconque, peut donc correspondre, suivant le couplage, une des vitesses de :

$$\frac{v}{3}, \frac{2v}{3} \text{ et } \frac{3v}{3} \text{ ou } v.$$

» Quand les moteurs seront placés par 6 et par 3 en série, les

inducteurs pourront être shuntés d'environ 50 pour 100 ; pour le couplage par 2 moteurs en série, les inducteurs ne pourront être shuntés que de 25 pour 100.

» Les caractéristiques de marche de cette machine sont représentées sur la figure 24 qui donne les efforts de traction en fonction de la vitesse en kilomètres par heure.

» Ces courbes sont cotées en ampères et, sur chacune d'elles, sont indiqués spécialement les points correspondant à un échauffement de 120° C en marche continue ou en marche unihoraire.

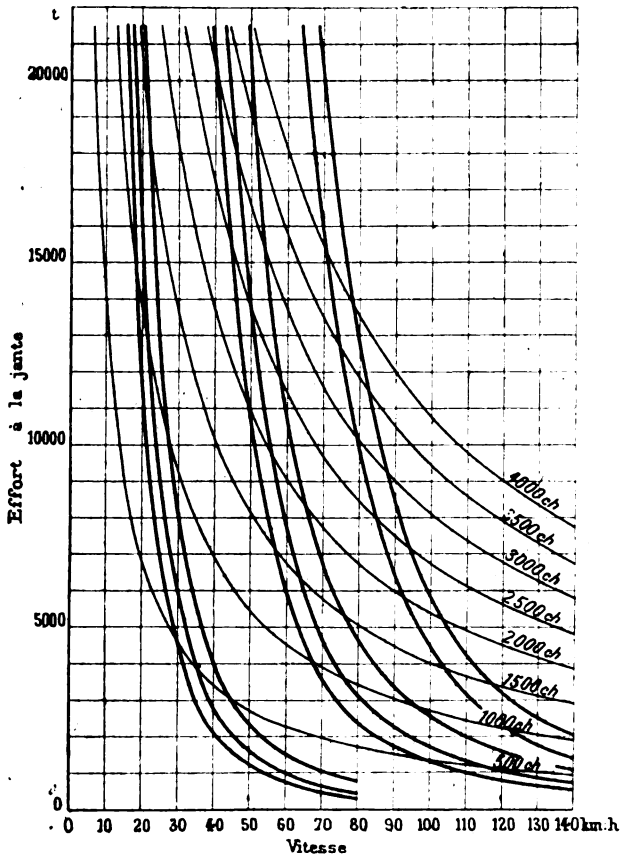


Fig. 24. — Locomotive à grande vitesse gearless. — Courbes des efforts de traction à la jante en fonction des vitesses, tension d'alimentation 1 350 volts, diamètre des roues motrices 1 200 mm.

» 2° *Attaque par engrenages.* — Pour les locomotives à grande vitesse sur lesquelles on désire disposer d'une puissance par essieu considérable (600 à 800 chevaux), il n'est pas possible pratiquement d'employer de moteurs à suspension par le nez analo-

gues à ceux utilisés sur les locomotives de trains de marchandises ou les automotrices, et on est forcé de recourir à des dispositifs plus compliqués permettant de faire porter entièrement les moteurs et les engrenages par le châssis et de réduire ainsi le voids non suspendu élastiquement.

» L'essieu devant pouvoir prendre par rapport à la roue d'engrenages qui doit l'entraîner des positions variables avec les inégalités de la voie, il faut établir, entre ces deux éléments de la machine, une liaison mécanique susceptible de permettre ces déplacements relatifs dans tous les sens.

» Le système de joint qui nous a paru le plus intéressant parmi tous ceux qui ont été proposés et essayés est celui construit

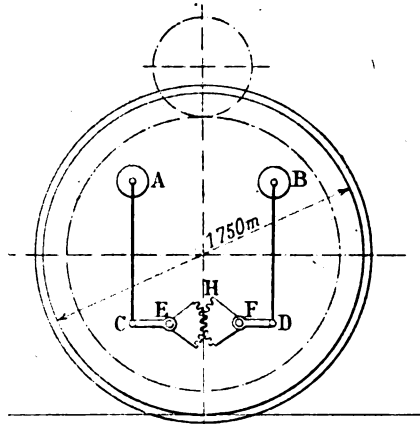


Fig. G. — Locomotive Brown-Boveri, dispositif d'entraînement des roues motrices.

par la Société Brown-Boveri et déjà employé sur un certain nombre de locomotives à voyageurs des Chemins de fer fédéraux en service sur la ligne de Berne à Thoun.

» Ce joint (fig. G), imaginé par M. Buchli, est constitué essentiellement par deux systèmes de bielles articulées dont les déplacements angulaires sont rendus égaux par une liaison par engrenages. Les têtes sphériques des bielles AC et BD peuvent tourner dans des coussinets faisant corps avec la roue, tandis que les axes EF des bielles CH et HD font corps avec l'engrenage suspendu.

» A l'état statique, l'arbre et l'essieu sont dans le prolongement l'un de l'autre et à l'état dynamique, ils peuvent prendre l'un

par rapport à l'autre une certaine différence de niveau et une certaine inclinaison.

» Les têtes des bielles étant sphériques, le mouvement se transmet sans coïncement, quelle que soit la position relative de la roue motrice et de la roue d'engrenages.

» Cette disposition de bielles, qui n'est qu'une variante de celle employée sur les automotrices de la Valteline dès 1902, par M. de Kando, est excessivement simple. Elle permet de transfor-

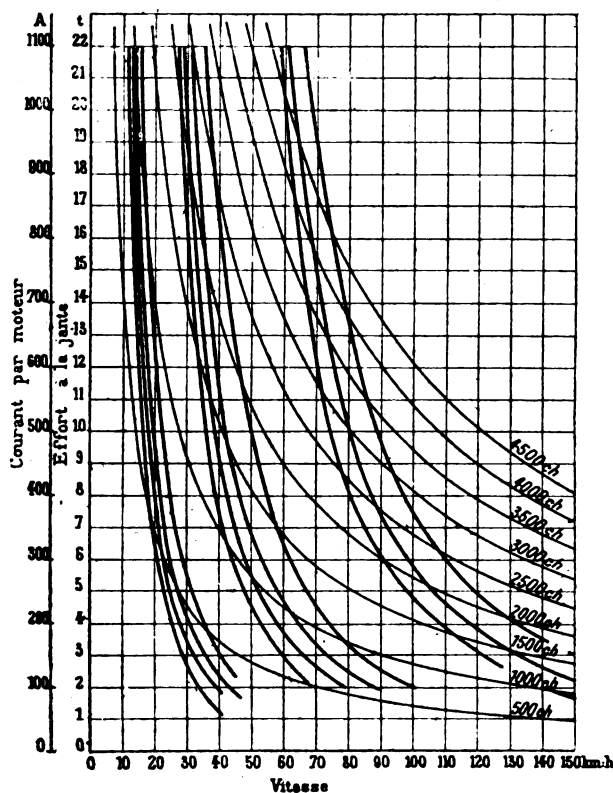


Fig. 25. — Locomotive à grande vitesse Brown-Boveri 2D2 (4 moteurs de 950 ch. moteurs non compensés). — Courbes des efforts de traction à la jante en fonction des vitesses. — Rapport de réduction de l'engrenage $1/2,57$, rendement mécanique 0,95, diamètre des roues motrices 1 750 mm.

mer un mouvement de rotation uniforme en un mouvement de rotation également uniforme lorsque l'arbre de la roue est exactement dans le prolongement de l'axe de l'essieu.

» Lorsque ces deux axes sont à des hauteurs différentes ou ont pris l'un par rapport à l'autre une certaine inclinaison, le mouvement transmis à la roue n'est plus rigoureusement uni-

forme, mais l'irrégularité dans un tour est inférieure à 1 pour 100 pour les déplacements maximum pratiques.

» La Compagnie du Chemin de fer d'Orléans a commandé deux machines d'essai du type 2D2 à 4 essieux moteurs à commande individuelle par engrenages et joint Buchli à la Compagnie Electro-Mécanique.

» Ces machines seront munies de 4 moteurs, bobinés chacun pour la tension de 1 500 volts et ayant une puissance pendant une heure de 850 chevaux et une puissance continue de 750 chevaux à 1 350 volts. La vitesse sera réglée par changement de couplage des moteurs et par variation du nombre de tours inducteurs.

» Sur l'une des machines commandées, les moteurs seront du type ordinaire, le nombre de tours inducteurs pouvant être réduit de manière à réaliser 4 vitesses de marche économique, aux positions série et série parallèle et seulement 3 au couplage parallèle.

» La figure 25 donne, en fonction des vitesses exprimées en kilomètres par heure, les efforts de traction correspondant aux différents couplages et aux différentes valeurs du champ inducteur.

» Sur la seconde des machines commandées, les moteurs seront du type entièrement compensé afin de permettre de pousser beaucoup plus loin la réduction du champ inducteur et d'obtenir un plus grand nombre de marches économiques.

» La figure 26 montre que, pour n'importe lequel des efforts de traction pratiquement utilisés, on peut faire varier la vitesse d'une façon presque continue entre 20 et 100 km:h.

» Cette variation de vitesse sera aussi progressive que celle que l'on obtiendrait dans une locomotive monophasée par variation de la tension d'alimentation des moteurs.

» Il y a lieu de remarquer que, pour que la machine puisse fonctionner pratiquement d'une façon soutenue à toutes ces marches économiques, il est nécessaire que les induits soient assez largement dimensionnés pour pouvoir supporter, par exemple en série parallèle, des intensités sensiblement doubles de celles qu'ils absorberaient, pour le même effort de traction et pour la même vitesse, en parallèle avec champ maximum.

» C'est pour cette raison que l'on n'a pas hésité à construire pour ces machines, des moteurs de puissances pendant une heure et continue relativement élevées, beaucoup plus grandes que

celles qui sont nécessaires pour les besoins actuels de l'exploitation.

» 3° *Attaque par bielles.* — Le système de commande par bielles est celui qui semble avoir reçu le plus d'applications, non seulement dans la construction des locomotives à vapeur, mais même dans celle des locomotives électriques de grande vitesse.

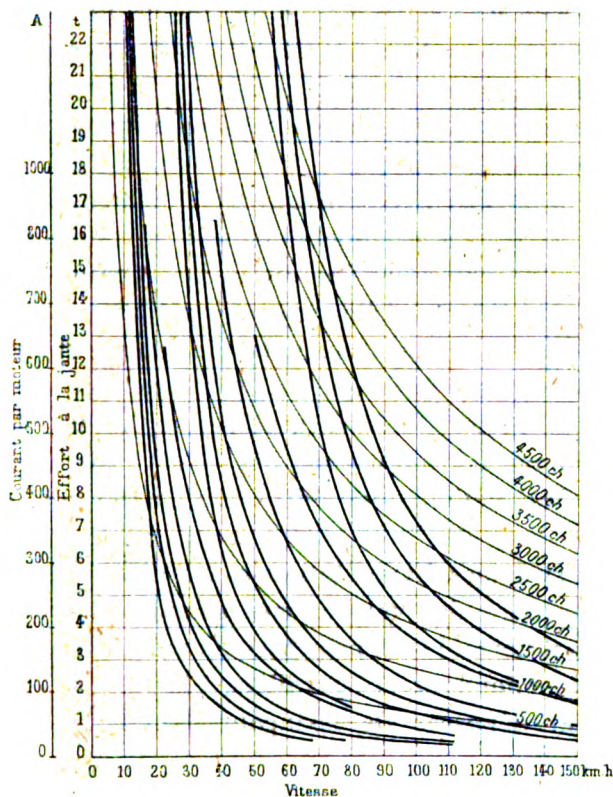


Fig. 26. — Locomotive à grande vitesse Brown-Boveri 2D2-n° 2 (4 moteurs de 950 ch moteurs compensés). — Courbes des efforts de traction à la jante en fonction des vitesses. — Rapport de réduction de l'engrenage 1/2,57, rendement mécanique 0,95, diamètre des roues motrices 1 750 mm.

» Les Italiens l'emploient presque exclusivement pour la commande des essieux de leurs locomotives triphasées; les Suisses, les Allemands et les Suédois l'emploient également pour leurs locomotives monophasées.

» Aux Etats-Unis, la plupart des locomotives à courant continu, monophasé ou mono-triphasé, construites par le Pennsylvania Railroad, sont également à commande par bielles.

» Il ne faut pas se dissimuler, cependant, que ce système de transmission réintroduit dans la construction des locomotives électriques des complications et des difficultés spéciales, des variations périodiques de l'effort et des effets d'inertie analogues à ceux existants dans les locomotives à vapeur à mouvement alternatif. ⁽¹⁾

» Dans une étude que nous avons faite antérieurement, nous avons montré que les transmissions par bielles peuvent être classées, comme tous les systèmes articulés, en deux catégories nettement distinctes, comprenant les systèmes hyperstatiques ou à liaisons surabondantes, et les systèmes isostatiques qui sont constamment en équilibre statique.

» Dans les systèmes hyperstatiques, les liaisons sont assurées par des groupes d'organes fonctionnant « en parallèle », la répartition de la charge entre les différents organes ne s'établissant que grâce au jeu et à l'élasticité des pièces.

» Dans les systèmes isostatiques, les liaisons sont assurées par des groupes d'organes fonctionnant « en série », la répartition de la charge entre les différentes pièces se faisant directement et simplement par décomposition des efforts suivant les directions mêmes des bielles, c'est-à-dire suivant les lois de la statique.

» Dans les systèmes hyperstatiques, les efforts dans les bielles peuvent prendre des valeurs très grandes, hors de proportion avec l'effort normal à transmettre, de même que, quand deux alternateurs fonctionnent en parallèle, la valeur du courant d'échange peut dépasser de beaucoup l'intensité normale de chacun d'eux.

» Dans les systèmes isostatiques, du fait de la déformabilité du système articulé, de la mise en série des liaisons, la transmission du mouvement des moteurs aux roues ne peut être assurée que par l'ensemble des deux mécanismes de droite et de gauche. Avec un seul mécanisme en service, celui de droite ou celui de gauche, le système ne peut fonctionner ; la transmission serait folle.

» Dans les systèmes hyperstatiques, le mouvement peut être transmis avec un seul des deux mécanismes de droite ou de gauche (exception étant faite du passage des points morts). Si on admet

(1) *Revue générale des Chemins de fer*, t. XII, mars 1922, p. 193.

qu'il n'y a pas de jeu et que les machines sont parfaitement réglées, les deux systèmes de transmission, isostatique et hyperstatique, fonctionnent exactement de la même manière ; mais s'il y a des jeux ou s'il se produit un dérèglement quelconque, le système isostatique avec entraînement élastique permet, par sa déformation, la continuation du mouvement sans inconvénient grave, les têtes de bielles continuant à appuyer constamment sur leurs coussinets.

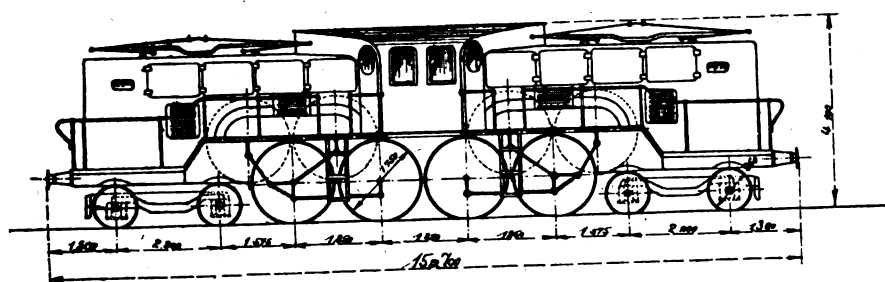


Fig. H. — Locomotive électrique à grande vitesse de la Société Ganz, système isostatique.

» Dans les systèmes hyperstatiques, il doit, au contraire, se produire nécessairement, en cas de dérèglement ou de mauvais montage, des efforts considérables susceptibles de provoquer des déformations ou des ruptures de pièces.

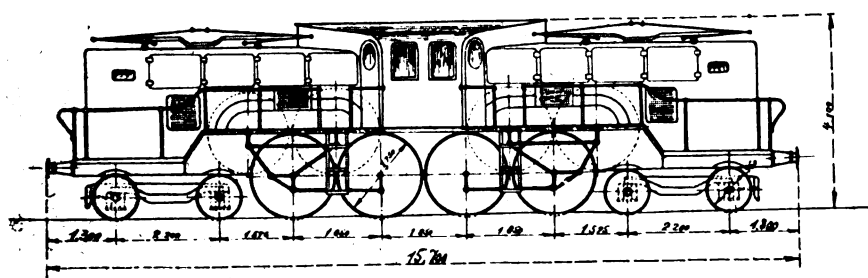


Fig. I. — Locomotive électrique à grande vitesse de la Société Ganz, système hyperstatique.

» Les cinq locomotives à 600 volts, de 2 000 chevaux, actuellement en service sur la ligne de Paris à Juvisy et munies de bielles isostatiques avec entraînement élastique, ont donné des résultats trop satisfaisants pour qu'il ne fût pas désirable d'essayer ce mode de transmission sur des locomotives à grande vitesse.

» Toutefois, il a paru utile de faire une comparaison directe entre les transmissions hyperstatiques et les transmissions iso-

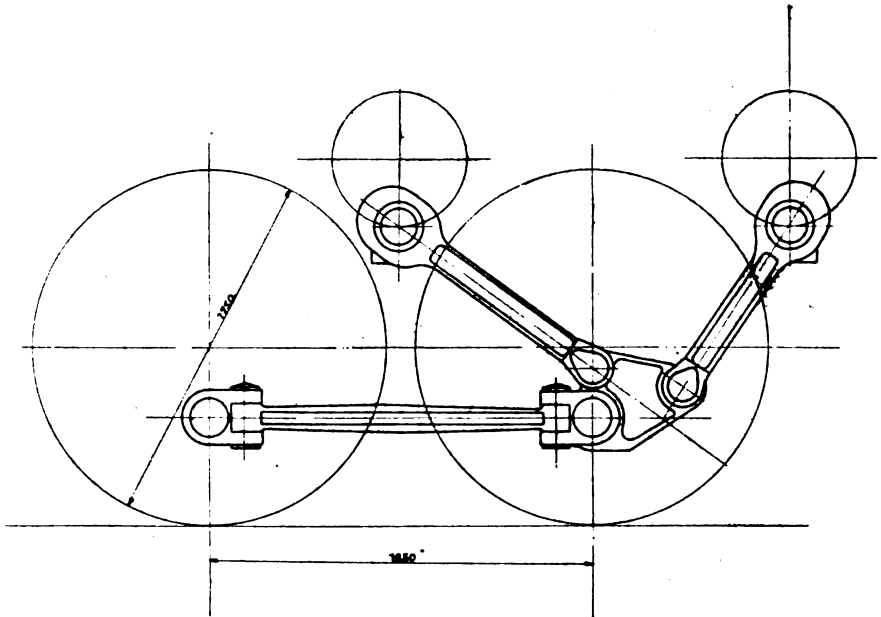


Fig. J. — Locomotive Gauz, mécanisme moteur isostatique.

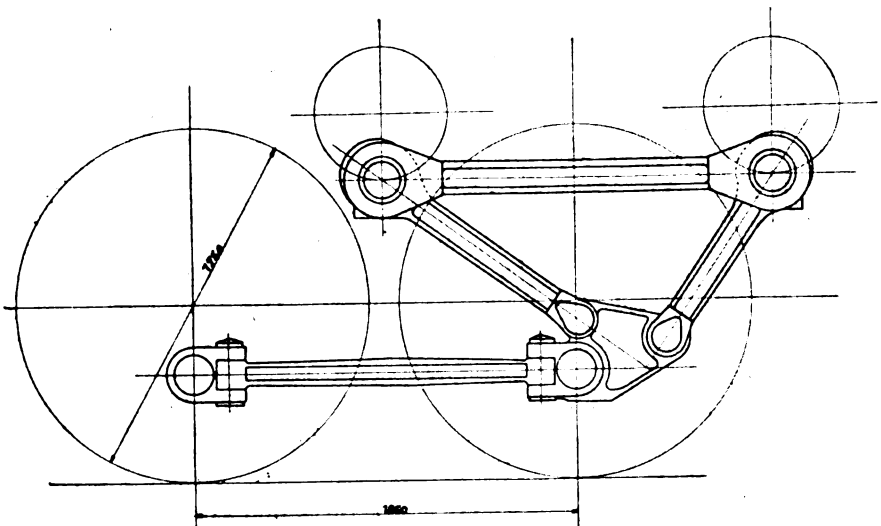


Fig. K. — Locomotive Gauz, mécanisme moteur hyperstatique

statiques, dans des conditions aussi identiques que possible avant de se prononcer définitivement en faveur de l'un des systèmes. Pour que cette comparaison fût concluante, il était nécessaire

de s'adresser au constructeur qui semble avoir acquis le plus d'expérience dans l'établissement des locomotives à bielles hyperstatiques en étudiant et mettant au point la presque totalité des machines italiennes.

» C'est pour cette raison que deux locomotives d'essai, l'une à bielles hyperstatiques, l'autre à bielles isostatiques, ont été commandées à la Société Ganz, de Budapest (fig. H et I).

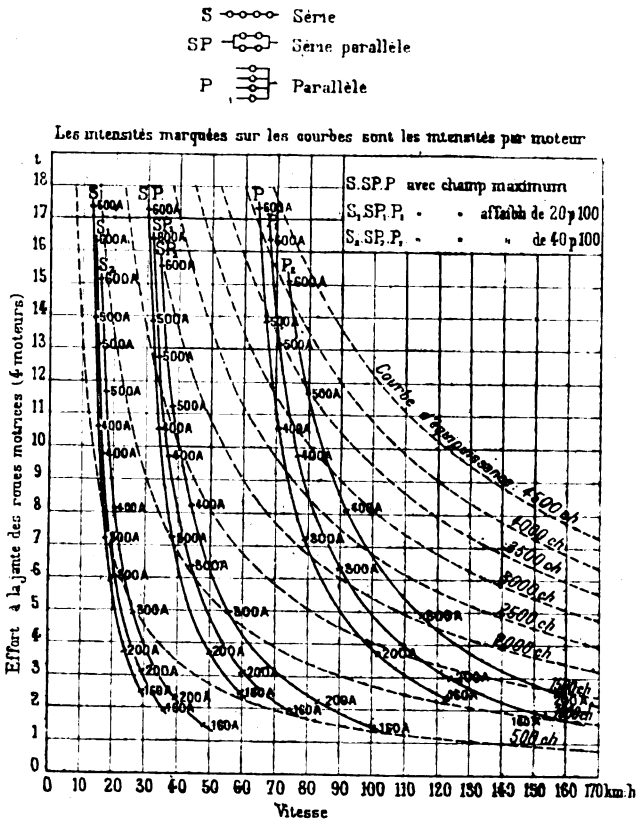


Fig. 27. — Caractéristiques des moteurs de traction type « TB 115 », correspondant à une tension moyenne par collecteur de 1 350 volts.
— Locomotive électrique à grande vitesse pour voyageurs, diamètre des roues motrices : 1 750 mm.

» Les figures J et K ci-contre représentent les deux systèmes de commande.

» Les deux machines en question seront du type 2D2, chaque groupe de deux essieux étant commandé par un groupe de deux moteurs.

» Pour les machines Ganz, comme pour les machines de la

Compagnie Electro-Mécanique, les moteurs auront une puissance pendant une heure de 850 chevaux et une puissance continue de 750 chevaux ; pour une locomotive, tous les moteurs seront du type ordinaire ; pour l'autre, ils seront du type entièrement compensé.

» Les figures 27 et 28 donnent, pour chacun des types de machines, en fonction de la vitesse, les efforts de traction corres-

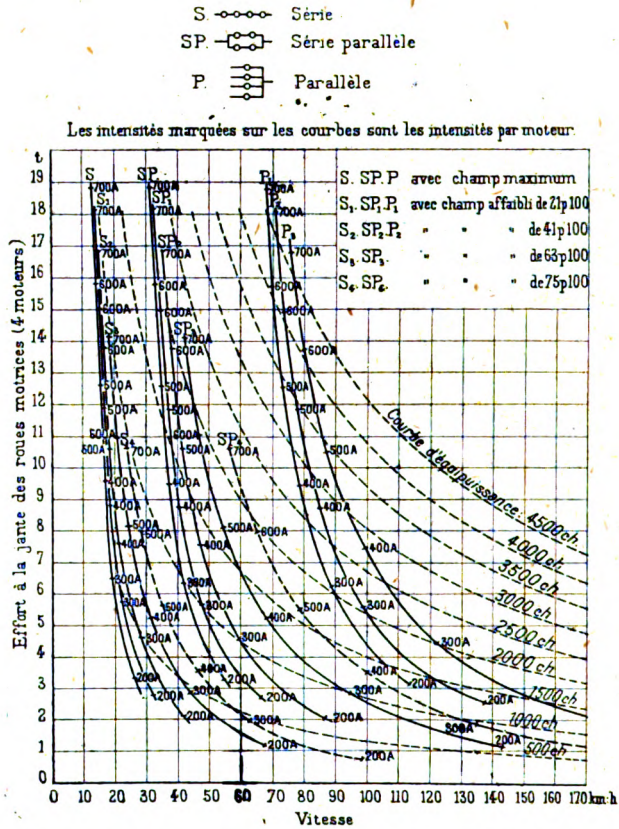


Fig. 28. — Caractéristiques des moteurs de traction type « TBs 115 », correspondant à une tension moyenne par collecteur de 1 350 volts. — Locomotive électrique à grande vitesse pour voyageurs, diamètre des roues motrices : 1 750 mm.

pondant aux 3 couplages, série, série-parallèle et parallèle, et différentes valeurs du champ inducteur.

» DISPOSITIONS DES TRAINS ROULANTS. — En ce qui concerne la disposition des trains roulants, il n'existe pas de doctrine universellement admise et il semble que là, plus peut-être encore que

pour les systèmes de transmission, il soit nécessaire de procéder à des essais systématiques.

» On est arrivé, après quatre-vingts ans d'efforts successifs, à établir empiriquement des types de machines à vapeur à grande vitesse très satisfaisants sans que l'on sache bien exactement quelles sont les conditions à remplir pour obtenir une marche stable.

» Le fait que des modifications importantes ont dû être apportées à des machines établies, il y a quelques années, par des constructeurs très avertis, prouve bien que la question est loin d'être au point.

» On peut se demander, tout d'abord, si, pour des locomotives d'une puissance analogue à celle que nous avons en vue, il faut employer des locomotives articulées ou des locomotives à châssis rigide.

» Dans l'un et l'autre cas, la question se pose de savoir quelle est la disposition à donner aux trains roulants et au système de rappel à employer pour les bogies directeurs.

» La locomotive « gearless » construite par la Société d'Etudes pour l'Electrification des Chemins de fer français, sera du type articulé 2C+C2, chaque demi-locomotive comportant un châssis rigide à 3 essieux moteurs et 1 bogie directeur qui sera monté d'une façon tout à fait analogue à celle des locomotives « gearless » du Chicago-Milwaukee-St-Paul, et d'une des machines de la série T du New-York-Central.

» Ce bogie pivote autour d'un axe vertical fixé au châssis et placé à l'arrière du bogie en dehors des essieux porteurs.

» Le dispositif de rappel indiqué par le schéma L ci-contre est constitué par deux plans inclinés placés à l'avant du bogie sur lequel roulent des galets solidaires du châssis. Ce système est disposé de manière à ce que, au moment du passage en courbe, la pression augmente sur la roue guide extérieure.

» Les essieux moteurs sur lesquels sont calés les induits des moteurs « gearless » ont un jeu latéral faible pour les deux roues motrices extrêmes et un jeu plus grand pour la roue intermédiaire.

» Les locomotives à engrenages et à bielles sont, au contraire, à châssis rigide, du type 2D2 à 4 essieux moteurs, bogie à l'avant, bogie à l'arrière.

» Dans les machines construites par la Compagnie Electro-

Mécanique, les bogies directeurs seront disposés de manière à ce que le système de rappel permette, non seulement de ramener le pivot du bogie dans l'axe de la locomotive, mais encore d'amortir les mouvements d'oscillations du bogie autour de son pivot. Ce système de rappel est représenté par la figure M ci-contre.

» Sur l'une des machines, un dispositif spécial permettra de déplacer le pivot du bogie de manière à déterminer quels sont les avantages et les inconvénients pour une machine donnée, du

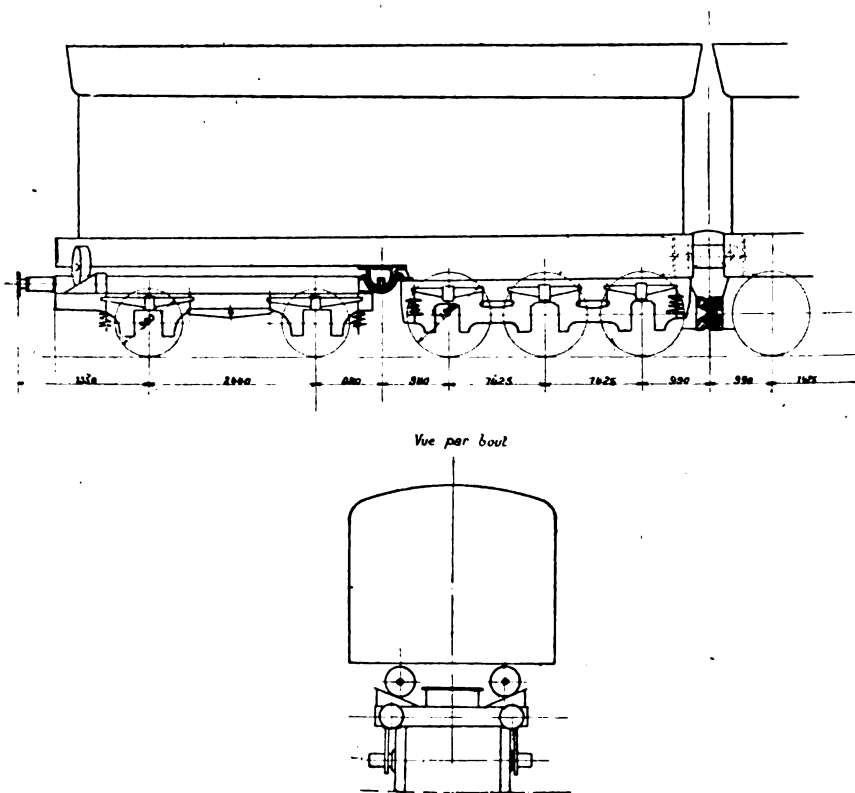


Fig. L. — Locomotives Gearless

pivotement autour d'un point situé à peu près dans l'axe du bogie et un point situé franchement en arrière. Dans les deux machines, l'appui de la caisse sur le bogie se fera par des semelles agissant au centre du truck de manière à produire un amortissement des mouvements relatifs d'oscillation qui pourraient se produire entre bogie et caisse.

» Dans les machines Ganz, des balanciers d'une forme spéciale permettent de maintenir la répartition des poids non seu-

lement entre les essieux moteurs, mais encore entre les essieux porteurs. Un système de balanciers permet d'établir, entre le pi-

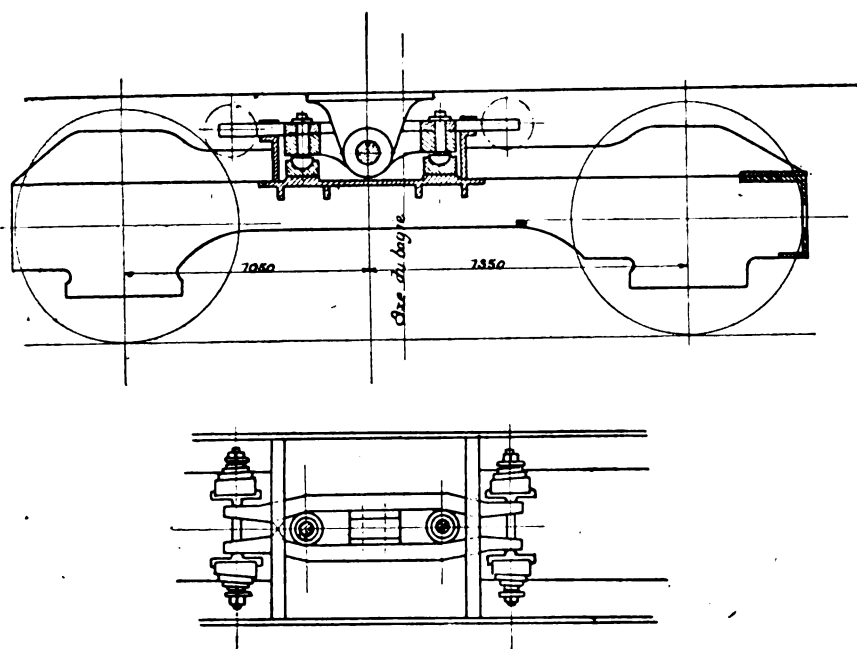


Fig. M. — Locomotive Brown-Boveri, rappel du bogie guide

voit du bogie directeur, le premier essieu moteur et le châssis, une liaison analogue à celle qui existe dans les bissels.

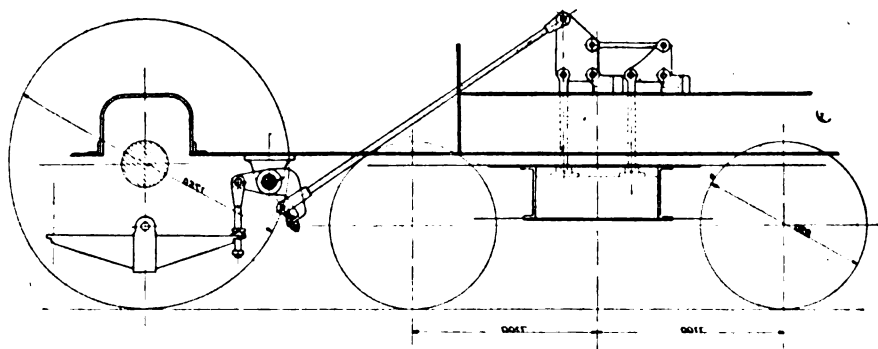


Fig. N. — Locomotive Ganz, suspension de bogie guide.

» Cette disposition de balanciers est représentée sur la figure N ci-contre.

» Grâce à cette disposition, la pression des roues du bogie est

augmentée sur les rails extérieurs au moment du passage en courbe.

» Le système de rappel de ces machines est représenté sur la figure O ci-contre. Il a été étudié en vue de conjuguer les déplacements transversaux du bogie directeur avec ceux des deux essieux moteurs voisins afin que le plus grand nombre de roues concourent à l'amortissement des chocs.

» Quand la locomotive s'engage dans une courbe, la poussée transversale que la voie exerce sur le bogie directeur se traduit d'abord par une compression des ressorts de rappel jusqu'au mo-

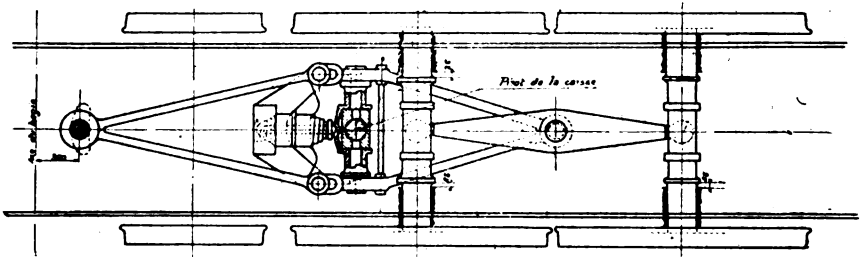


Fig. O. — Locomotive Ganz, dispositif de rappel du bogie guide

ment où leur réaction est devenue suffisante pour créer sur le pivot de la caisse un effort transversal susceptible de vaincre l'inertie de celle-ci et l'obliger à se rapprocher du centre de la courbe.

» Le point du châssis du bogie où s'exerce l'effort de rappel a été désaxé de 300 pour 100 par rapport au centre dans le but de ne pas apporter un surcroît d'effort transversal à l'essieu extrême du bogie qui est déjà soumis à la réaction de la voie et de réduire ainsi l'usure des boudins et la fatigue des rails. »

M. LE PRÉSIDENT remercie M. Parodi.

INFORMATIONS

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

I. INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

RÉUNION DU BUREAU DU 15 FÉVRIER. — La médaille de Faraday est décernée à Sir Algernon Parsons.

Le Bureau décide d'accorder des bourses de scolarité de 50 livres chacune par an, pendant trois ans, à deux enfants dont les pères, étant membres de l'Institution, auraient été, pendant la guerre, tués ou mis hors d'état de travailler.

Le Bureau désigne MM. Woodhouse, Hunter et Wedmore comme délégués officiels de l'Institution à la Conférence internationale des grands Réseaux, qui se tiendra à Paris en octobre 1923, sous les auspices de l'Union des Syndicats de l'Electricité.

Le Bureau signale qu'il a ouvert un registre pour l'inscription des membres de l'Institution se trouvant sans emploi ; ce registre reproduit le curriculum vitæ des candidats.

Le secrétaire demande aux membres de lui signaler les livres dont l'acquisition pourrait intéresser la bibliothèque.

La réception annuelle se tiendra le 28 juin 1923.

A la réunion mensuelle du 12 avril, M. Warren fera une communication sur la théorie et la pratique des rayons X.

II. AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

SÉANCE DU COMITÉ DE DIRECTION DU 16 MARS 1923. — *Election du nouveau Président.* — M. Harris J. Ryan, Stanford University Californie, est élu par 1 793 voix sur 1 897.

Revision des règles techniques. — Le Comité entreprend la revision complète de ses prescriptions techniques. Celles-ci vont être divisées en 27 chapitres. Le travail portera d'abord sur 6 chapitres qui serviront ensuite de modèle pour les autres.

Le Comité sollicite l'envoi de communications sur tous ces chapitres.

Chaque règle sera d'abord adoptée par une Section du Comité. Elle sera alors publiée dans le Journal pour appeler des critiques et des objections avant d'être adoptée par le Comité lui-même.

Le Journal rappelle, d'autre part, qu'il se manifeste parmi les électriciens un vif désir de voir les diverses sociétés électriques

s'entendre pour présenter un code unique des conditions techniques. Il ajoute que le manque d'unification a fort gêné les Etats-Unis pour l'élaboration d'une unification internationale et leur a rendu beaucoup plus difficile la vente du matériel électrique à l'étranger.

Le Comité des Règles a donc approuvé, le 10 novembre 1922, et le Comité de Direction de l'American Institute a adopté le 8 décembre 1922, une résolution invitant toutes les organisations électrotechniques du pays à désigner chacune un représentant pour arrêter dans une discussion commune les règles reconnues nécessaires.

Ces représentants pourront en référer à leurs mandants avant de donner leur concours.

Les règles ainsi adoptées seraient proposées à l'homologation de l'American Engineering Standards Committee.

Le Comité mixte constitué comme il a été dit plus haut, s'est déjà réuni pour étudier les règles concernant les appareils de contrôle ; on compte que son premier travail pourra être envoyé aux intéressés vers le 16 avril et être soumis à l'approbation du Comité des Règles vers le 11 mai.

III. — AMERICAN ENGINEERING STANDARDS COMMITTEE

Annuaire de l'American Engineering Standards Committee. — Ce Comité vient de publier son annuaire comprenant 55 codes techniques approuvés par lui l'an dernier, dont 15 concernant l'industrie électrique.

275 institutions techniques industrielles et gouvernementales, parmi lesquelles 8 sont électrotechniques, collaborent au travail entrepris par l'American Engineering Standards Committee.

Abréviations et Symboles. — Une récente conférence a réuni à New-York, sous les auspices de l'American Engineering Standards Committee, 36 délégués ; il a été reconnu que tous les intéressés réclamaient vivement l'unification des abréviations et des symboles graphiques, et que la coopération des Sociétés étrangères était souhaitable pour atteindre ce but.

Le travail va donc être entrepris par le Comité qui se conformera à la procédure suivie par l'American Engineering Standards Committee.

BIBLIOGRAPHIE

Exposé concernant les résultats actuels relatifs aux éléments isotopes. — Conférence faite à la Société de Chimie physique, par M. Maurice de Broglie. Une brochure in-8. Paris, librairie scientifique J. Hermann, 1923.

La découverte des isotopes a profondément modifié les idées que nous nous faisons de la composition de la matière en nous montrant que certains corps que nous considérons comme de même espèce, parce qu'ils possédaient des propriétés chimiques identiques, pouvaient avoir des poids atomiques différents. Il y a là une révolution à la base de la chimie classique.

La conférence de M. M. de Broglie sera lue avec intérêt par tous ceux qui s'intéressent à la science, et désirent se maintenir au courant de ses progrès incessants.

Les rayons d'électricité positive et leurs applications aux analyses chimiques, par Sir J.-J. Thomson, Master of Trinity College, Professor of Experimental Physics. Traduit d'après la 2^e édition anglaise par R. Fric et A. Corvisy, 1 volume in-8. Paris, librairie scientifique J. Hermann, 1923.

Dans sa première édition, sir J.-J. Thomson exprimait l'espoir que les rayons positifs rendraient d'importants services pour la solution de bien des problèmes chimiques. Cet espoir n'a pas été déçu, car c'est par l'étude de ces rayons qu'on a pu constater l'existence des isotopes.

Aussi cette seconde édition contient-elle beaucoup de faits nouveaux qui ne figuraient pas dans la première.

L'auteur commence par rappeler la nature des rayons positifs ; il signale les différents procédés pour les obtenir et les étudier. Il passe en revue les diverses recherches auxquelles ils ont donné lieu. En particulier, il montre que les corps bombardés par ces rayons d'électricité positive laissent échapper des gaz dont quelques-uns se présentent à nous dans des états sous lesquels nous n'étions pas habitués à les rencontrer.

Il termine en montrant comment les rayons positifs ont permis la détermination des poids atomiques et la découverte des isotopes.

L'ouvrage de J.-J. Thomson renseigne admirablement sur la nouvelle voie que la physique a trouvée pour l'étude de la matière, et nous ne saurions trop remercier MM. Fric et Corvisy de nous en avoir donné une traduction.

Traité théorique et pratique des règles à calculs Beghin. Règle de l'ingénieur et règle de l'officier de marine. Modes opératoires. Problèmes industriels. Tables et formules. par A. Beghin, licencié ès-sciences mathématiques et es-sciences physiques. Septième édition, 1 vol. 25 cm × 16 cm, de 200 pages avec figures. Paris, Ch. Béranger, 1922.

Les règles à calculs Beghin sont trop connues, notamment des ingénieurs et des marins, pour qu'il soit nécessaire de souligner ici l'extrême utilité de ces instruments et celle du traité qui en expose les modes d'emploi et les ressources innombrables. On rappellera toutefois que les règles Beghin résolvent les mêmes opérations que les autres, avec une approximation deux fois plus grande, et qu'elles réduisent à une opération unique beaucoup d'opérations subordonnées, telles que la double multiplication, la double division, le calcul des principales puissances fractionnaires.

Apportant aux éditions successives de son traité des améliorations et des compléments, l'auteur s'est appliqué sans cesse à constituer, pour ainsi dire, la technique de l'instrument et à la rendre de plus en plus assimilable, de manière qu'elle devienne, non seulement le vade-mecum de l'ingénieur, mais — dans un cercle d'opérations plus ou moins restreint, — la compagne du commerçant, de l'industriel et de l'ouvrier. Il semble bien que la nouvelle édition qui vient de paraître donnera pleine satisfaction à cet égard.

La mesure de la demande maximum,

Par P.-A. Borden (Amer. Inst. Elect. Eng., octobre 1920)

L'auteur décrit diverses méthodes d'estimation de la valeur de la demande maximum. La méthode des volts-ampères est probablement la plus logique. Les valeurs de « pointe soutenue », telles que déterminées par les graphiques des compteurs enregistreurs, sont souvent trompeuses. Quant aux valeurs des pointes intégrées, tirées de ces mêmes compteurs, elles sont difficiles à mesurer et sujettes à des erreurs d'interprétation. Les lectures des appareils du type Merz sont erratiques, tout en donnant une valeur satisfaisante de la moyenne arithmétique. Les lectures individuelles des compteurs logarithmiques sont meilleures que celles du type Merz, et se rapprochent ordinairement davantage des valeurs réelles des moyennes arithmétiques. La moyenne logarithmique est probablement aussi légitime que la moyenne arithmétique, comme base de la mesure de la demande, puisque l'échauffement suit une loi logarithmique.

Longues lignes de transmission d'énergie à haute tension.

Par A. Mc Kinstry (Inst. Elect. Eng., octobre 1920)

Ce mémoire, que l'on ne saurait résumer en quelques lignes, se compose principalement de formules et de tableaux. Il est divisé en sept chapitres, savoir :

(I) Formules fondamentales pour lignes de transmission sans dérivations. — (II) Détermination d'une ligne de 90 milles de longueur (145 km), transmettant une puissance de 25 000 kw sous forme de courant triphasé à 50 p : s, 100 kilovolts, avec un facteur de puissance de 80 pour 100. — (III) Transmission à tension constante. — (IV) Calcul du diagramme circulaire relatif à la ligne du chapitre II. — (V) Calcul de la capacité des condensateurs synchrones nécessaires pour exploiter la ligne du chapitre II. — (VI) Détermination d'une ligne de 380 milles de longueur (611 km), transmettant 18 000 kw sous forme de courant triphasé 25 p : s, 130 kilovolts. — (VII) Tableaux des données de lignes, etc., nécessaires pour effectuer les calculs.

La distribution de l'électricité

Par W.-B. Woodhouse (Inst. Elect. Eng., janvier 1921).

Les principales conditions d'une distribution économique sont déterminées par des considérations techniques et financières opposées. L'auteur explique comment certaines approximations peuvent aider à fixer les principales conditions techniques. Il montre la nécessité d'utiliser plusieurs tensions du service et propose une expression générale en vue de la détermination du capital à engager pour l'installation du réseau et des sous-stations. L'effet du facteur de charge sur les pertes est considéré, et une formule d'un emploi général est établie.

Les approximations atteintes permettent d'appliquer la loi de Kelvin à la détermination des densités de courant et de la chute de tension économiques.

Se basant sur des considérations relatives aux frais d'installation, l'auteur indique une méthode propre à fixer le nombre et la puissance des sous-stations les plus avantageux.

Enfin, l'auteur présente d'intéressantes remarques concernant l'emploi des câbles et des lignes aériennes à haute tension, et il montre comment on peut parvenir au choix des tensions de service les plus économiques pour les diverses parties du réseau.

IL Y A TRENTE ANS

La nouvelle usine d'éclairage électrique de la Gare Saint-Lazare (M. A. Cance). — Sur le programme provisoire proposé pour le Congrès international des Electriciens de Chicago, en 1893 (M. E. Hospitalier). — Discussion (MM. Blondel, Guillaume, Hospitalier). — Sur les conditions de couplage des alternateurs (M. Blondel) (suite et fin). — Les isolants hétérogènes, par M. Hess (M. Géraudy). — Discussion (MM. Picou, Géraudy, R. Arnoux).

Le Gérant : J. Guyot.

Imp. Henriot, 20, rue Gerbert, Paris.

AUG 1 1923

III. (4^e SÉRIE.)

N^o 24.

AVRIL 1923

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :

12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

LABORATOIRE :

12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs. Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en France

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

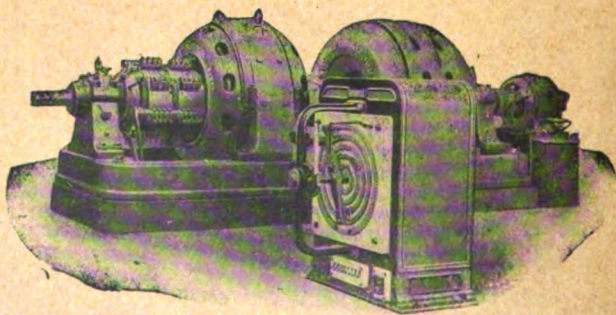
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de l'Assemblée générale annuelle et de la réunion mensuelle ordinaire du mercredi 11 avril 1923 : Admission de membres titulaires, p. 169. — Membres décédés, p. 170. — Don à la Société. Ecole, p. 170. — Rapport de la Commission des Comptes (M. GUÉRY), p. 171. — Rapport du Comité d'Administration (M. MAURICE LEBLANC), p. 179. — Rapport sur le fonctionnement du Laboratoire Central et de l'Ecole supérieure d'Electricité (M. PAUL JANET), p. 183. — Les phénomènes de surtension dans l'électrolyse et l'influence des colloïdes (MM. C. MARIE et AUDUBERT), p. 193. — Résultat des élections : MM. P. APPELL et FERRIÉ, présidents d'honneur ; renouvellement des membres du Bureau, du Comité et de la Commission des Comptes, p. 194. — Modifications du règlement intérieur d'administration en vue de la création d'un poste de délégué général de la Société Française des Electriciens, p. 196. — Allocution de M. MARCEL BRILLOUIN, président sortant, p. 197.

INFORMATIONS, p. 202.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 204.

IL Y A TRENTE ANS, p. 208.

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE

ET DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 11 avril 1923 ⁽¹⁾

Présidence de M. MARCEL BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Boury (André-Camille), Directeur technique de la Société pour l'Équipement électrique des Véhicules, 106, avenue du Maine, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Dubois et Ed. Grassot.

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Cohu** (Merry), Elève à l'E. S. E., 56, boulevard Pasteur, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Gau-Segonzac** (Maurice), Elève à l'E. S. E., 13, rue Nicolas-Charlet, à Paris (15°). — Présenté par MM. P. Jaffet et C.-F. Guilbert.
- Girard** (André-Joseph), Ingénieur E. S. E., Ingénieur au Service commercial de la Société « Ateliers J. Carpentier », 9, rue Henriette, à Clamart (Seine). — Présenté par MM. L. Joly et Ch. David.
- Krach** (Louis-Charles), Elève de l'E. S. E., 12, rue Saint-Hyacinthe, à Paris (1°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Lequerler** (Gustave), Directeur des Services commerciaux à la Compagnie Electro-Céramique, 130, rue de Tocqueville, à Paris (17°). — Présenté par MM. H. Jouvion et Rollin.
- Mauger** (Jean-Edouard), 4, rue de Fleurus, à Paris (6°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Maquaire** (C.), Ingénieur E. P. C., 101, rue de Vaugirard, à Paris (6°). — Présenté par MM. P. Boucherot et H. Jouvion.
- Sternberg** (Antony-Lucien), Ingénieur E. S. E., à la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité, 66, boulevard Pereire, à Paris (17°). — Présenté par MM. Eschwège et Locherer.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de M. *John Moulton* ; il adresse à la famille de ce membre les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part du don suivant.

Ecole : de M. Perroux, un alternateur à haute fréquence.
Il adresse à ce donateur les remerciements de la Société.

La séance est alors suspendue pendant quelques minutes pour permettre aux sociétaires présents qui n'auraient pas encore voté de déposer dans l'urne leur bulletin de vote. Puis les bureaux de scrutin étant constitués, il est donné suite à l'ordre du jour de la séance.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES POUR L'EXERCICE 1922

M. GUÉRY, *rapporteur*. — « Messieurs, nous avons l'honneur de vous présenter notre rapport sur la mission que vous nous avez confiée d'examiner les comptes de l'exercice 1922.

» Suivant l'usage, ces comptes sont répartis en trois chapitres : Services généraux, Laboratoire et Ecole.

» Nous allons vous indiquer les particularités les plus notables se rapportant à chacun de ces chapitres.

I. — Services généraux

» Le produit des cotisations a atteint 58 277,25 fr et n'est qu'en très légère augmentation sur le produit des cotisations de l'exercice précédent.

» La caractéristique la plus importante de la situation financière du dernier exercice est l'augmentation très notable de l'intérêt des fonds placés.

» Nous devons également vous signaler le legs Ancel, la nouvelle donation réalisée en 1922, et qui est venu accroître l'actif du bilan de 10 059,12 fr.

» Les souscriptions pour le Laboratoire ont produit 73 050,05 francs, qui se décomposent de la manière suivante :

Ministère des Travaux publics	50 000 fr
Caisse des Recherches scientifiques	5 000
Le Matériel téléphonique	100
Maison Dinin	100
Appareillage électrique Grivolos	100
Société Electro-Câble	150
Alliot et Rol	150
Compagnie générale de Travaux d'Eclairage et de Force	200
M. Richard	250
Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité	500
Compagnie de la Loire et du Centre	250
Société des Applications industrielles	500
M. Lienard	500
Geoffroy et Delore	500
Est-Lumière	500
Compagnie de Constructions électriques	500
Compagnie anonyme Tudor	600
Société des Téléphones	1 000
Hillairet	1 500
Société d'Electricité de France	2 000
Compagnie des Compteurs	3 000
Compagnie parisienne de Distribution d'Electricité	1 000
Société l'Air liquide	200
Société l'Electricité de Saint-Cloud	200
Etablissements Sautter-Harlé	4 250,05
	73 050,05

» Les donateurs habituels ont, en général, répondu à notre appel : nous avons eu toutefois le regret de ne rien recevoir du plus important d'entre eux.

» Pour la première fois, depuis plusieurs années, nous avons été dans l'obligation de faire appel à nos réserves spéciales pour une somme de 25 991,29 fr., afin d'équilibrer le budget du Laboratoire.

» Au bilan des services généraux, nous noterons, avec l'attribution du legs Ancel dont nous avons déjà parlé, l'augmentation due aux emplois statutaires et aux bénéfices de l'année.

» Nous noterons également la diminution appréciable du compte d'ordre résultant de la plus-value des valeurs.

» Enfin, la bibliothèque est en augmentation de quelques centaines de francs par suite d'améliorations apportées à l'organisation matérielle.

» Au total, l'actif net des services généraux au bilan de 1922, s'élève à 391 898,30 fr
en augmentation de 35 133,86 fr
sur l'exercice précédent.

II. — Laboratoire

» Les redevances pour essais et étalonnements sont en augmentation sensible, mais les dépenses ayant également augmenté, la Société a dû verser au Laboratoire une subvention de 119 041,34 dont le chiffre est d'ailleurs très inférieur aux prévisions.

» Pour apprécier exactement l'importance de cette subvention, il y a lieu de tenir compte de l'acquisition d'instruments montant à 19 934,90 fr
qui représentent une augmentation d'actif.

» L'excédent d'actif est de 573 459,57 fr
en augmentation de 19 934,90 fr
par rapport à l'exercice précédent.

III. — Ecole

» La situation financière de l'Ecole fait ressortir un solde cré-
diteur de 204 585,78 fr
auquel il y a lieu d'ajouter le versement de 30 139,85 fr
au fonds de réserve et l'acquisition de 33 637,40 fr
d'instruments. Dans ce dernier chiffre, il faut comprendre une

somme de 542,55 fr qui représente le commencement des dépenses engagées pour la création de la ligne artificielle pour laquelle un budget de 15 000 fr a été voté.

» Cet excédent important résulte de l'augmentation du nombre des élèves.

» L'Ecole a reçu 55 000 fr de souscriptions, se répartissant comme suit :

Sous-secrétariat de l'Enseignement technique ..	50 000 fr
Compagnie Edison	1 000
M. Eiffel	1 000
M. Geoffroy	1 000
M. Robard	1 000
Société Gramme	1 000

» Au bilan de l'Ecole, il y a lieu de faire la même remarque qu'à celui de la Société, c'est-à-dire qu'il y a eu une diminution du compte d'ordre, qui passe de 34 978,35 fr à 30 959,08 fr, résultant de la plus-value sur les fonds placés.

» L'actif se trouve augmenté, au chapitre des instruments et matériel des achats faits en 1922, et il se trouve diminué des appareils réquisitionnés par la Guerre en 1914, dont le prix continuait à figurer aux comptes et dont la cession a été réglée seulement cette année.

» Au total, les instruments et matériel entrent dans l'actif de l'Ecole pour 292 846,50 fr
contre 276 294,65 fr
en 1921.

» L'excédent d'actif de l'Ecole est de 1 178 611,44 fr
en augmentation de 267 820,48 fr
sur 1921.

Conclusion

» L'actif net total de la Société, au 31 décembre 1922, est de 2 143 969,31 fr
contre 1 821 080,07 fr
au 31 décembre 1921.

» Soit un accroissement d'actif de 322 889,24 fr

» Ces résultats témoignent de la prospérité de votre Société.

» Des voix autorisées vous diront tout à l'heure quels efforts

SITUATION FINANCIÈRE

COMPTES DE L'EXERCICE 1922

RECETTES

	fr	1	2	00
Cotisations libérées.....		58	277,25	
Cotisations de l'exercice.....		27	960,01	
Intérêts des fonds placés.....			906,90	
Produit du bulletin.....	fr			
Intérêts du legs Hughes.....	2	135,00		
Réserve.....	1	430,35		
Intérêts du legs Cheux.....	1	933,75		
Réserve.....	1	894,80		
Intérêts de la Fondation Joubert.....	3	10,50		
Réserve.....	155,40			
Intérêts de la Fondation Cohen.....	290,00			
Réserve.....	221,55			
Intérêts de la Fondation Guyau.....	2	400,00		
Réserve.....	1	200,00		
Intérêts du legs Ancel.....	262,25			
Legs Ancel.....	8	946,00		
Souscriptions.....	73	050,05		
Participation de l'Ecole.....	20	000,00		
Prélèvement sur fonds affectés antérieurement au Laboratoire.....	25	991,29		
Profits et pertes.....	2	031,31		
	fr	231	155,41	

DÉPENSES

	fr	1	2	00
Frais de publications :				
Dépenses.....	15	917,05		
Recettes diverses.....	4	400,00		
Frais de réunions.....	1	715,25		
Personnel.....	34	613,65		
Frais d'administration.....	4	799,33		
Entretien de la bibliothèque.....	2	448,90		
Frais de correspondance.....	2	606,10		
Comité électrotechnique et divers.....	4	500,00		
Intérêts de la Bourse :	fr			
Hughes.....	1	750,00		
Réserve.....	1	824,35		
Intérêts de la Bourse Cheux (placement).....	1	882,67		
Réserve.....	1	945,88		
Intérêts de la Fondation Joubert.....	3	10,50		
Réserve.....	155,40			
Intérêts de la Fondation Cohen.....	391,60			
Réserve.....	119,95			
Intérêts de la Fondation Guyau.....	1	200,00		
Réserve.....	2	400,00		
Legs Ancel (réserve).....	262,25			
Placement du legs Ancel.....	8	912,88		
» » (à placer).....	33,12			
Cotisations irrécouvrables.....	400,00			
Subvention au Laboratoire.....	119	041,34		
Placement au fonds de réserve :				
Cotisations libérées.....	1	750,00		
Intérêts des revenus.....	4	733,00		
Solde créditeur.....	6	483,00		
	17	822,19		
	fr	231	155,41	

II. — Laboratoire

Personnel.....	179	835,10
Frais d'administration :		
Frais de bureau, etc.....	5	701,60
Chauffage.....	18	069,00
Eau, électricité.....	2	077,50
Téléphone.....	1	414,70
Opérations et essais taxés :		
Arrérages de la rente.....	7	903,00
Redevances pour essais et étalonnements.....	186	268,89
Redevances des Elèves et Tiers.....	967,00	
Subvention de la Société.....	119	041,34
Amortissement de la Marine : fr		
Constructions.....	2	853,25

Matériel 14 860.30

17 713.55

331 893.78

Moteurs, etc. 40 264.40
 Produits 7 529.00
 Atelier 647.60
 Déplacements du personnel 2 986.25
 Loyers, impôts, assurances 1 221.40
 Entretien des bâtiments 21 469.88
 Entretien des machines et appareils 9 224.00
 Expériences et recherches 1 552.05
 étude des in-
 terrupteurs 3 352.05
 Acquisition d'instruments etc 19 936.90
 Amortissement de la Marine 17 713.55
 Comité d'éclairage 200.00
 Profits et pertes 252.85

331 893.78

III. — Ecole.

Redevances des Elèves et Auditeurs

Frais d'études (y compris Sor-
 bonne 12 575 fr) 637 091.00
 Fournitures diverses 31 534.00
 Intérêts des fonds placés 19 073.00
 Souscriptions 55 000.00
 Subvention de la Ville de Paris... 2 000.00
 Radiotélégraphie : Frais d'études . 77 116.55
 Profits et pertes 9 265.30

831 079.85

Personnel 204 196.85
 Frais d'administration :
 Frais de bureau, correspondance. - 13 547.85
 Chauffage et éclairage 11 962.45
 Travaux des Elèves :
 Moteurs, etc. 8 139.90
 Produits et dépenses diverses... 9 031.65
 Atelier 11 930.45
 Conférences, projets, etc. 108 606.60
 Fournitures diverses 22 752.20
 Impôts, assurances 8 355.25
 Entretien des bâtiments 24 668.57
 Entretien des machines et appareils. 15 390.95
 Location de salles 10 525.00
 Participation à la subvention au La-
 boratoire 20 000.00
 Radiotélégraphie 73 307.10
 Acquisition d'instruments
 et de matériel, appa-
 reils divers 33 094.85

RÉCAPITULATION

Services généraux 231 155.41
 Laboratoire 331 893.78
 Ecole 831 079.85
 1 394 129.04

1 394 129.04

Frais accessoires de la
 ligne artificielle, petit
 outillage, etc. 542.55
 Sorbonne 33 637.40
 Fonds de réserve 7 716.00
 Reconstruction de l'école 30 139.85
 Solde créditeur 12 646.00
 204 585.78

831 079.85

1 394 129.04

BILAN AU 31 DÉCEMBRE 1922

I. — Services généraux.

		PASSIF	
		fr	fr
Fonds de réserve :	46 obl. P.-L.-M. 3 %	14 996,00	1 054,00
	8 obl. Est 3 o/o	2 608,00	22 352,09
	4 obl. Ouest-Algérien 3 % ..	1 184,00	14 261,48
	758 fr de rente 3 o/o	14 907,00	1 824,35
	660 fr de rente 5 % 1916...	10 098,00	155,40
	290 fr de rente 4 % 1918...	4 640,00	1 845,88
	18 obl. Midi 3 %	5 652,00	119,95
	Espèces	6 913,84	2 400,00
	Legs Hughes :		
	1 500 fr de rente 3 %	29 500,00	262,25
Legs Cheux :	635 fr de rente 5 % 1916 ...	9 715,00	238 822,53
	1 222 fr de rente 3 %	24 032,00	786,80
	6 obl. Midi 3 %	1 884,00	
	660 fr de rente 5 % 1916 ..	10 098,00	
Fondation Joubert :	15 fr de rente 5 % 1916	229,50	36 243,50
	Espèces	7 498,00	
Fondation Cohen :	23 obl. P.-L.-M. 3 %	26,28	7 524,28
	Espèces		
Fondation Guyau :	250 fr de rente 4 o/o 1917...	3 975,00	
	2 400 fr de rente 4 o/o 1917	38 160,00	
Fondation Ancel :	27 obl. Midi 3 %	8 478,00	
	16 obl. sexennales	1 548,00	
Fonds disponibles :	Espèces	33,12	10 059,12
	41 fr de rente 5 % 1916	627,30	
Bons "Défense Nationale" :	2710 fr de rente 4 % 1918...	43 360,00	
	16 obl. Nord 3 %	5 200,00	
Compte d'ordre	30 obl. Etat 4 o/o	10 470,00	
	40 obl. Orléans 4 %	13 760,00	
Caisse	100 obl. Cr. National 1919	49 200,00	
	Bons "Défense Nationale" 34 453,75	157 071,05	
Crédit Lyonnais	78 102,69		
	3 596,57		
Brault	84 147,53		
	120 593,45		
Chèques postaux	4 214,50		

Caisse des dépôts..... 41,30
Débiteurs divers..... 4 525,00
Bibliothèque..... 25 518,20
Mobilier..... 1 900,00
675 886,03

II. — *Laboratoire.*

Bibliothèque..... 2 975,40
Construction..... 226 536,43
Canalisations électriques..... 2 277,00
Instruments et matériel..... 433 126,84
Caisse..... 620,31
Débiteurs divers..... 50 261,09
Cautionnement..... 640,00

Créditeurs divers..... 51 521,41
Ministère de la Marine..... 91 456,10
142 977,50
Actif..... 716 437,07
Passif..... 142 977,50
Excédent de l'actif... 573 459,57

III. — *Ecole.*

Instruments et matériel..... 292 846,50
Constructions..... 90 216,20
Fonds de réserve (valeur au 31 décembre 1923) :
10 obl. Orléans 4 % (344 fr) 3 440,00
12 obl. Nord 3 0/0 (325 fr) 3 900,00
10 obl. Etat 4 0/0 (340 fr) 3 400,00
1 800 fr rente 6 % (88,75 fr) 26 625,00
300 obl. sexennales, mai 1923 (98,30 fr) 30 669,00
03 obl. Ouest 3 0/0 (321,75 fr) 29 875,00
Bons "Défense Nationale" : 30 000,00
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1923) :
14 obl. Nord 3 0/0 (325 fr) 4 550,00
20 obl. Orléans 4 % (344 fr) 6 880,00
1250 obl. sexennales (99,50 fr) 124 375,00
Bons "Défense Nationale" : 380 600,00
109 obl. Ouest 3 0/0 (321,25 fr) 35 016,00
75 obl. Orléans 6 0/0 (430,75 fr) 32 981,00
65 bons Lyon 6 0/0 (513,50 fr) 33 377,00
75 obl. Lyon 6 0/0 (452 fr) 33 900,00
63 obl. Midi 6 0/0 (446 fr) 28 098,00
65 bons Midi 6 % (515 fr) 33 475,00
Compte d'ordre..... 722 252,00
Caisse..... 30 959,08
Cautionnement..... 761,50
Débiteurs divers..... 143,35
224 293,26

Créditeurs divers..... 27 918,80
Redevances des Elèves pour 1923..... 138 375,00
Autographies 1923..... 30 863,55
Radiotélégraphie : fr
Redevances des Elèves pour 1923..... 58 771,15
Réserve..... 37 678,35
116 449,50
313 606,85
Actif..... 1 492 218,29
Passif..... 313 606,85
Excédent de l'actif... 1 178 611,44

RÉCAPITULATION

Services généraux, Excédent de l'actif. 391 898,30
Laboratoire..... 573 459,57
Ecole..... 1 178 611,44
2 143 969,31
Excédent d'actif .. 741 572,08
2 143 969,31
2 884 541,39

1 492 218,29
2 884 541,39

sont faits pour développer son rôle technique si brillant dans le passé, et si nécessaire dans l'avenir.

» Le résultat de ces efforts sera, sans nul doute, d'amener de nouvelles adhésions à la Société et de donner ainsi une ascension plus rapide au chiffre des cotisations.

» Vous connaîtrez, d'autre part, les résultats de la souscription ouverte pour doter l'Ecole des vastes locaux qui sont nécessaires à son développement.

» Nous souhaitons que cet exode de l'Ecole vers de nouveaux horizons pleins de promesses ait son heureuse répercussion sur le Laboratoire, en permettant son extension matérielle. Nous sommes de ceux qui pensons qu'à l'Etablissement de haute valeur scientifique que votre initiative a constitué pourrait être adjoint un Laboratoire plus nettement industriel qui apporterait au premier des ressources matérielles et profiterait en même temps de l'expérience scientifique de ses éminents collaborateurs.

» Le développement rapide des hautes tensions qui se manifeste à l'heure actuelle nécessite l'étude expérimentale de nombreuses questions pour lesquelles une organisation matérielle importante est nécessaire, mais serait insuffisante sans une méthode scientifique rigoureuse. Nous avons ici les compétences : l'organisation matérielle n'est plus à la hauteur des besoins.

» Les remarques que nous venons de faire ressortent directement de l'examen de vos comptes. Ce sont les chiffres eux-mêmes qui parlent.

» Messieurs, nous vous proposons d'approuver le bilan et les comptes de l'exercice 1922 tels qu'ils vous sont présentés, et de vous joindre à nous pour remercier votre trésorier et votre administrateur de la scrupuleuse rigueur qu'ils apportent à l'accomplissement de leur mission.

Mis aux voix, ce rapport est adopté à l'unanimité.

RAPPORT DU COMITÉ D'ADMINISTRATION

M. Maurice LEBLANC, *Secrétaire général*. — « Messieurs, conformément à l'usage, nous venons vous rendre compte de l'activité de notre Société pendant l'année écoulée.

» Nous vous parlerons d'abord des travaux de nos sections :

» La deuxième section a continué sous la présidence de M. Lebaupin, auquel M. Bossu apporte, comme secrétaire, une si active collaboration, à se réunir fréquemment, et à faire une fructueuse besogne.

» La question de l'éclairage des studios et de l'effet nocif sur les yeux des artistes des sources de lumière employées, entamée l'année précédente, a été de nouveau examinée.

» MM. Pionnier et Martin, des Etablissements Gaumont, ont continué à nous apporter le concours de leur expérience de spécialistes, ainsi que M. Paulin, représentant la Maison Bardon. Après avoir visité les studios Gaumont, la deuxième section s'est rendue à Bellevue, au Laboratoire de la Direction des Inventions, où M. Breton qui suit fidèlement les séances de la section, nous a présenté le studio installé sur la terrasse de l'établissement.

» Le côté physiologique de la question n'a pas été négligé : M. Bossu a rendu visite au Docteur Piéron, professeur à la Sorbonne, et au docteur Pollack, de l'Institut ophtalmologique Rothschild, spécialistes en la matière, qui ont bien voulu lui donner leur avis.

» Le Docteur Pollack est venu devant la section, présenter un film panchromatique qui, s'il n'exigeait pas des temps de pose aussi longs, résoudrait la question en permettant l'emploi de sources de lumière moins riches en courtes longueurs d'onde. Des films panchromatiques et ordinaires ont pu, grâce à l'obligeance de M. Breton, être projetés en comparaison devant la deuxième section, rue de Staël, et commentés par le Docteur Comandon. Les membres présents se sont rendus compte de la différence énorme entre ces deux espèces de films, quant à l'effet artistique et la vérité documentaire.

» M. Bossu présentera dans une prochaine séance les conclusions personnelles auxquelles l'ont conduit l'ensemble de ces travaux de la deuxième section.

» Celle-ci a également abordé, au cours de l'année, l'étude du Cahier des Charges pour lampes d'automobiles. M. Monnier

a été chargé de rapporter la question. Le sujet est important parce qu'il semble que les automobilistes qui utilisent l'éclairage électrique ont éprouvé quelques déboires dont il faut sans doute chercher la cause dans un manque d'entente entre les fabricants de lampes et les fabricants d'accessoires, difficultés qu'un cahier des charges accepté par les uns et les autres doit permettre d'éviter. Pour arriver à ce but, la deuxième section s'efforce donc de concilier les points de vue de la Chambre syndicale des Constructeurs de lampes à basse tension, d'une part, et de celle des Fabricants d'accessoires et de pièces détachées pour automobiles, de l'autre.

» Enfin, la deuxième section a décidé récemment de remettre à son ordre du jour la vaste question de l'éclairage des écoles qui pourra sans doute être étudiée, en collaboration avec le Comité national de l'Eclairage. M. Leblanc a présenté un rapport précisant l'état de la question.

M. Bunet, président de la troisième section, a fait les plus louables efforts pour lui donner quelque activité, mais bien que comme le dit un procès-verbal de cette section, « la majeure partie des importants perfectionnements réalisés ces dernières années dans l'électrochimie, l'électrométallurgie et la construction des accumulateurs n'aient pas été publiés et qu'il y a une lacune que la troisième section pourrait utilement combler », il semble que peu de membres de la Société s'intéressent à ces questions qui, pourtant, sont d'un intérêt industriel considérable.

» Cependant, vous entendrez ce soir une communication de M. Marie, et prochainement une de M. Nissou, sur des sujets de la compétence de cette section.

» La quatrième section, sous la présidence de M. Parodi, a mis à son programme l'étude des lignes à haute tension, en la divisant en cinq parties :

- » 1° Choix de la fréquence ;
 - » 2° Statistique sur les lignes ;
 - » 3° Méthode de calculs ;
 - » 4° Constructions des lignes (pylônes, tension de pose des conducteurs) ;
 - » 5° Fonctionnement des centrales en parallèle.
- » La section a déjà entendu de M. Darrieus, chargé de rappor-

ter la deuxième et la cinquième partie du programme, un rapport sur les méthodes de calcul des lignes à haute tension.

» Vous aurez sans doute l'occasion avant la fin de l'année d'entendre en séance publique quelques conclusions des travaux de cette section.

» Les première, cinquième et sixième sections ne se sont pas réunies au cours de l'année, et nous ne pouvons que le déplorer au point de vue de l'activité technique de notre Société.

» Nous nous sommes efforcés de varier autant que possible le choix des sujets traités en séance publique. La construction des ampoules à rayons X nous a été présentée par M. Johannès et M. Saget nous a décrit un générateur à haute tension pour leur alimentation.

» Dans le domaine des appareils de mesure, nous avons entendu une communication de M. Joly sur les ampèremètres électrodynamique à shunt et une de M. Ilivici sur les transformateurs de mesure. M. Pérot nous a présenté un appareil pour la détermination rapide du champ magnétique terrestre.

» M. Lavet a présenté une mise au point complète de la question des horloges électriques.

» Les questions de construction, sur lesquelles il est toujours aussi difficile d'obtenir des communications, ont été abordées par M. Bunet, dans une « étude sur les surtensions dans les transformateurs », et par M. Bethenod, à qui nous devons cette année deux conférences, l'une sur la « théorie de la dynamo à 3 balais », l'autre sur « le compoundage des alternateurs ».

» En traction électrique, M. Parodi nous a présenté de façon très complète la manière dont devait être envisagée l'électrification d'un grand réseau de chemin de fer. Nous avons également entendu M. Iglésis nous parler des électrobus à trolley et M. Duthil des transmissions électriques dans les engins de guerre ; ces deux dernières communications ont été agrémentées de projections cinématographiques extrêmement intéressantes.

» M. de Traz nous a présenté un type très pratique de poutres pour poteaux en bois.

» En ce qui concerne les applications de la télégraphie sans fil, M. Belin nous a exposé les résultats qu'il a déjà obtenus, dans la transmission des images à distance, et nous a fait entrevoir les plus belles espérances. M. Maurice Leblanc nous a montré ce

qu'on pouvait espérer des appareils à 3 électrodes dans la vapeur de mercure. Enfin M. Brillouin a bien voulu, de sa manière si claire, résumer pour nous les théories électriques de la matière, et nous montrer en quelle manière les techniciens peuvent en espérer bientôt quelque secours.

» Nous devons remercier particulièrement les conférenciers qui, comme M. Johannès ou M. Belin, n'ont pas hésité à transporter un matériel important et monter des expériences délicates pour illustrer leurs communications.

» Dans l'ensemble, nous avons réussi à faire paraître le Bulletin de manière un peu plus régulière, et nous avons rattrapé partiellement le très gros retard que nous avons l'année dernière, mais nous avons encore de grands progrès à faire pour arriver à un résultat complètement satisfaisant.

» Messieurs, je terminerai en vous rappelant les noms de ceux que nous avons eu le regret de voir disparaître au cours de cette année : MM. Gatehouse, Leclanché, Barré Gaston, Moreno, Armen-gaud, Mahul, Benoit René, Avril Charles, Pacault, Gourguechon, Pinet Etienne, Clerc Marcel, Sequin Léon, Lorreau A., Geneux François, Laporte F., Gastanheiras das Neves, Street Charles, Clifton R.-B., Bouty, Chailloux, Barrière Just, A. Bochet, Kelly, Grimaldi, Maquaire F.-V., Romeyn, Moulton.

» Parmi ces noms, figurent ceux de deux anciens présidents, MM. Bouty et Bochet, et de M. Laporte, qui fut si longtemps le collaborateur de M. Janet, au Laboratoire central d'Electricité. Les travaux de M. Bouty et de M. Bochet ne nous appartiennent pas en propre, mais l'œuvre de M. Laporte, c'est l'activité depuis vingt ans du Laboratoire central. M. Janet s'occupe de faire recueillir les notes qu'il a laissé inachevées ou celles que dans sa modestie il ne croyait pas digne d'être connues. Leur publication dans le Bulletin leur donnera la notoriété qu'elles méritent.

» Nous renouvelons à la famille des membres disparus l'assurance de notre respectueuse sympathie.

Mis aux voix, ce rapport est adopté à l'unanimité.

RAPPORT ANNUEL SUR LE LABORATOIRE CENTRAL
ET L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

M. Paul JANET. — « Messieurs, j'ai l'honneur de présenter à l'Assemblée générale de notre Société mon rapport annuel sur le fonctionnement du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Electricité, pendant l'année 1922.

1. — Laboratoire central d'Electricité

» Le Laboratoire a été profondément éprouvé en 1922 par la mort de son sous-directeur. M. Laporte, qui était entré au Laboratoire en 1895, s'était surtout spécialisé dans les questions d'éclairage et de photométrie et aussi dans les questions d'accumulateurs. Il y avait acquis une compétence universellement reconnue. Sa disparition s'est fait vivement sentir au Laboratoire. M. Durand qui, depuis 1891, remplissait les fonctions de chef des Travaux et, depuis 1921, sous-directeur adjoint, a été nommé sous-directeur à sa place.

» 1° *Personnel*. — Le personnel comprend à l'heure actuelle : un directeur, un sous-directeur, deux chefs de travaux, deux chefs de service, trois chefs de travaux adjoints ou assistants et sept aides. Si ce personnel restreint, grâce à un dévouement de tous les instants, arrive à assurer le service des essais de plus en plus délicats demandés au Laboratoire, il lui devient difficile d'effectuer des recherches, et nous le déplorons vivement, car nous avons pu constater à diverses reprises que les résultats des travaux de ce genre, faits au Laboratoire central d'Electricité, étaient fort appréciés dans l'industrie.

» 2° *Matériel*. — Nous ne pouvons, à ce sujet, que répéter ce que nous disions l'année dernière. Nous éprouvons les plus grandes difficultés à nous procurer les appareils qui nous sont nécessaires, les constructeurs nous demandant des délais considérables.

» Parmi les principaux appareils acquis par le Laboratoire en 1922, nous signalerons un électrodynamomètre Siemens à miroir, un fréquencesmètre portatif à lames vibrantes, un voltmètre Carpentier à plusieurs sensibilités, trois wattmètres électrodynamiques Carpentier et trois wattmètres de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, douze transformateurs d'intensité dont six isolés pour la tension de 15 000 volts, une étuve destinée

à l'étude des propriétés des substances isolantes à des températures de 500 à 600 degrés, un autotransformateur permettant sous une tension de 110 volts aux primaires d'obtenir simultanément, par variation de un volt, toutes les tensions comprises entre 80 et 240 volts.

» 3° *Installations.* — Devant le nombre croissant des essais de durée de lampes, nous avons cru bon de doubler l'installation servant à ces essais. Nous avons été ainsi conduits à acheter l'autotransformateur dont il est fait mention plus haut.

» Le Laboratoire était jusqu'ici en état de soumettre simultanément aux essais de durée 100 lampes consommant en tout au maximum 10 kilowatts, il sera sous peu en état d'essayer 200 lampes avec une puissance de 25 kilowatts.

» 4° *Essais.* — Le nombre des essais effectués en 1922 s'est élevé à 1 563 contre 1 176 en 1921. Les recettes ont été de 186 327 fr contre 172 473 en 1921.

» Les essais se répartissent ainsi :

	1922	1921
Lampes à incandescence	529	351
Fers, tôles	186	145
Percements aux hautes tensions (Rigidité diélectrique)	181	138
Ampèremètres	96	39
Voltmètres	81	43
Résistivités	70	51
Piles	61	58
Wattmètres	50	14
Compteurs divers	38	149
Isèlements	36	15
Machines	30	35
Accumulateurs	23	14
Compteurs Ministère	19	22
Oscillogrammes	6	
Paratonnerres	3	2
Lampes à arc	2	
Divers	101	100

» On voit par ce tableau l'importance des essais portant sur les substances isolantes étudiées surtout au point de vue de la rigidité diélectrique. C'est un fait du reste que de plus en plus les constructeurs se préoccupent de la qualité des matériaux qu'ils utilisent dans la réalisation de leurs machines. Ces essais de rigidité diélectrique dont quelques-uns ont été faits à température variable, se répartissent ainsi : Essais d'huiles 81, d'isolants solides 83, d'isolateurs 51.

» Au sujet des essais d'isolateurs, nous devons constater avec regret, que nous n'avons pu effectuer tous ceux qui nous étaient demandés, les installations du Laboratoire ne permettant pas

d'atteindre les tensions auxquelles ces isolateurs devraient être éprouvés.

» Ces installations ne permettent pas, en effet, de dépasser 120 000 volts, alors que beaucoup de fabriques de câbles ou d'isolateurs disposent de moyens leur permettant d'essayer leurs produits jusqu'à 300 000 volts. Il devient très urgent de mettre le Laboratoire à même de disposer, pour ses essais à haute tension, d'une installation en rapport avec les besoins actuels de l'industrie électrique. C'est un desiderata que nous avons déjà exprimé, du reste, l'année dernière.

» Parmi les essais qu'il convient de signaler, nous mentionnons :

» La réception dans une usine de province des câbles à haute tension, destinés à des canalisations à établir pour un service public dans la banlieue de Paris.

» Des relevés oscillographiques dans une installation comportant des batteries de condensateurs destinés à relever le facteur de puissance.

» Des relevés oscillographiques effectués dans une usine génératrice du nord de la France.

» Nous devons également mettre en évidence le nombre des essais effectués sur des transformateurs de mesure. Ces essais, qui comportent une détermination précise du rapport de transformation et du déphasage sont très délicats et demandent une grande pratique de la part des opérateurs. Les mesures sont particulièrement difficiles dans le cas des transformateurs à grande intensité ou à très haute tension. Nous avons eu cette année à étudier des transformateurs de courant jusqu'à 2 000 ampères et des transformateurs de tension jusqu'à 45 000 volts.

» Le service des essais de machines, assuré par M. Lemepand, a eu, comme vous l'avez vu plus haut, à étudier 37 machines ; une quinzaine de ces essais ont été effectués en dehors du Laboratoire.

» Nous avons eu également à effectuer un grand nombre d'essais magnétiques. Comme je le signalais dans mon rapport de l'année dernière, la détermination des pertes totales par la méthode du wattmètre présente certaines difficultés. Nous pensons être arrivés aujourd'hui à les surmonter et notre méthode est actuellement complètement au point.

» Le Laboratoire a continué cette année, comme les années

précédentes, l'examen des compteurs soumis à l'approbation ministérielle.

» Des modifications à l'arrêté régissant les conditions que doivent remplir ces compteurs ont amené un surcroît de travail dans ce service que dirige M. Durand.

» Nous avons continué pour le compte du Ministère de la Marine des essais relatifs aux accumulateurs de sous-marins.

» Mais l'installation établie pour soumettre ces accumulateurs aux secousses qu'ils subiraient dans la réalité ne permettait d'essayer à la fois que quatre éléments.

» La Marine a demandé au Laboratoire de réaliser une installation permettant d'essayer simultanément douze éléments. L'organisation de cette installation qui va nécessiter la construction de nouveaux bâtiments est à l'étude.

Le nombre des essais demandés sur les lampes à incandescence à atmosphère gazeuse va toujours en croissant. Comme je le signalais dans mon dernier rapport, ces lampes ne peuvent être définies que par le flux lumineux total qu'elles émettent.

» C'est ce qui avait amené Laporte à réaliser un photomètre sphérique diffusant d'après le principe indiqué, il y a un certain nombre d'années, par M. Blondel.

» La mise au point de cet appareil est assez délicate. La mort de M. Laporte avait un peu retardé cette mise au point. M. Jouaust, qui a pris le service de la photométrie, s'en occupe activement, et nous espérons disposer avant peu d'une méthode de mesure très précise du flux total émis par les lampes. Mais nous avons constaté que le diamètre de notre lunemètre (1 mètre) était encore insuffisant pour les lampes de très grosses intensités lumineuses et nous envisageons pour l'avenir la réalisation d'un photomètre diffusant de 3 mètres de diamètre.

» 5° *Relations avec l'Union des Syndicats de l'Electricité.* — Le personnel du Laboratoire prend part aux discussions d'ordre technique qui s'élèvent dans les diverses commissions de l'Union des Syndicats de l'Electricité. C'est ainsi que M. de la Gorce a été amené à prendre part aux travaux des 10^e, 14^e et 18^e commissions qui s'occupent des isolants. De même M. Lemenand a pris part aux travaux de la 5^e commission (essais d'automobiles électriques) et de la 2^e commission (échauffement des conducteurs).

» 6° *Recherches.* — Nous ne ferons que, comme tous les ans, regretter que le personnel du Laboratoire ne puisse consacrer

plus de temps aux recherches. En 1922, M. Frigon, professeur à l'Ecole polytechnique de Montréal, ingénieur diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité, titulaire de la Bourse Hughes, a poursuivi au Laboratoire des recherches sur les pertes d'énergie dans les diélectriques et leur variation en fonction de la température. Ce travail commencé en 1921 a été terminé en 1922. Il a paru dans le Bulletin de la Société française des Electriciens et a valu à son auteur le titre de Docteur de l'Université de Paris.

Le personnel du Laboratoire, se conformant en cela aux désirs de ses fondateurs, s'occupe toujours activement des unités électriques et des étalons servant à les représenter.

» Comme je l'avais signalé dans mes précédents rapports, une étude avait été entreprise pour comparer entre eux les dix étalons prototypes de l'ohm construits par notre regretté membre d'honneur, M. René Benoit.

» J'ai déjà signalé combien cette étude avait été pénible. La nécessité d'employer des galvanomètres très sensibles influencés par suite par les champs des courants de traction ne permettait de faire les mesures qu'entre une heure et trois heures du matin. M. Jouaust a terminé ce travail dans le courant de 1922 et le résultat de nos mesures a fait l'objet d'une note présentée à l'Académie des Sciences dans sa séance du 10 juillet 1922. Le résultat de ce travail est le suivant:

» Deux tubes présentant des défauts ont été éliminés du calcul des résultats.

» Pour les huit tubes seulement considérés, l'écart entre la valeur déduite des mesures géométriques et celle déduite des mesures électriques ne dépasse pas, pour chaque tube, quelques cent-millièmes, la valeur absolue de la moyenne des écarts étant de $1,9 \times 10^{-5}$ ohm.

» Nous avons eu, au commencement de 1922, la visite de M. Isakoff, physicien du Bureau des Poids et Mesures de Pétrograd. Il était porteur d'un ohm en manganin conforme aux étalons mercuriels construits en Russie. Les résultats des comparaisons de cet ohm dans les divers laboratoires nationaux ont fourni les résultats suivants :

	0,9999804 ohm du Laboratoire central d'Electricité.	
Valeur à 18°	0,999997	» du Laboratoire national Physical.
de l'ohm 4014	1,000006	» du Laboratoire du Physikalischtechnische Reichsanstalt.

» Nous devons, en outre, signaler qu'à la demande du Comptoir d'Achat de Tôles dynamos, qui désire modifier le cahier des charges imposé à ses fournisseurs, M. Jouaust et Mlle Bourgoignon ont entrepris des mesures sur les variations des pertes des tôles en fonction de l'induction. Signalons enfin qu'à la demande de la 6^e commission de l'Union des Syndicats de l'Electricité, le Laboratoire a entrepris des essais sur les disjoncteurs à huile.

» Grâce à l'obligeance de M. Védovelli, qui a bien voulu mettre à la disposition du Laboratoire les ressources dont dispose l'usine de Vitry de la Métallurgique Electrique, un certain nombre d'essais préliminaires ont été effectués. Ces essais ont comporté entre autres choses des relevés cinématographiques à grande vitesse, montrant le fonctionnement de l'interrupteur, l'amorçage et l'extinction de l'arc, etc. Nous aurons occasion de revenir ultérieurement sur ces recherches importantes qui n'en sont encore qu'à leurs débuts.

II. — École supérieure d'Electricité

» I. *Matériel.* — A) *Atelier.* — Nous avons pu, cette année, grâce à une stricte économie dans les frais généraux de l'atelier, disposer d'une somme suffisante à l'achat d'un tour Ernault de 150 mm de hauteur de pointe, d'un modèle récent et permettant les travaux les plus divers. Une commande de 4 petits tours est, d'autre part, en cours d'exécution.

» B) *Salle des machines.* — Les groupes triphasés et diphasés mentionnés dans mon précédent rapport ont été livrés et fonctionnent depuis la rentrée.

» A noter également l'achat de deux boîtes de contrôle Chauvin et Arnoux, un wattmètre Carpentier, une magnéto à courant continu, ainsi que d'un palan à rail pour le démontage des machines.

» C) *Salle des mesures.* — A la suite des conférences sur les lignes artificielles faites l'an dernier, à l'Ecole, par M. Kennelly, votre Comité a bien voulu ouvrir au budget de l'Ecole un crédit supplémentaire de 17 500 fr destiné à la construction d'une ligne artificielle. Actuellement la plus grande partie du matériel nécessaire est commandé et livré ; toutefois, par suite de la difficulté que nous éprouvons à obtenir des condensateurs ayant les qualités nécessaires, l'état de construction de cette ligne n'est pas aussi avancé que nous l'avions espéré.

» Le Laboratoire de mesures de l'Ecole s'est enrichi de quelques appareils, parmi lesquels nous citerons : deux wattmètres, dont un spécialement destiné à la mesure des pertes dans les tôles ; un galvanomètre balistique à longue période ; un galvanomètre Abraham pour courants alternatifs ; un phasemètre.

» Des dons importants nous ont été faits également par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs (deux rhéostats transformateurs, un compteur O, K., un compteur wattheuremètre, deux bobines pour la mesure des champs) et par la maison J. Carpentier (deux ampèremètres électromagnétiques, un voltmètre de précision).

» II. *Enseignement et personnel.* — Le regretté sous-directeur du Laboratoire central, M. Laporte, qui était chargé des conférences sur l'éclairage électrique, a dû être remplacé dans cet enseignement, et le choix de la commission administrative de l'Ecole s'est porté sur M. Jouaust, qui assure, maintenant, au Laboratoire, le service de photométrie. Il n'a pas été, cette année, apporté de changements notables au programme général des conférences de l'Ecole ; nous prévoyons, toutefois, que certains groupes accessoires devront prochainement être révisés pour tenir compte de l'importance de plus en plus considérable des groupes principaux.

» J'ajoute que la réunion dans une même main de tout ce qui se rapporte au calcul et à la construction des machines électriques a donné les plus heureux résultats et a permis au conférencier de développer notablement la partie construction qui nous avait été maintes fois signalée comme traitée d'une façon un peu trop rapide.

» III. *Promotion XXVIII (1921-1922).* — Il a été délivré, à la fin de juillet 1922, 225 diplômes, se répartissant ainsi :

Officiers et ingénieurs délégués par l'Etat.....	46
Officiers de marine (en congé régulier)	3
Ingénieurs des Arts et Métiers	45
Licenciés ès-Sciences	20
Ingénieurs des Arts et Manufactures	16
Ingénieurs des Instituts électrotechniques (Grenoble, Nancy, Toulouse)	12
Anciens élèves de l'Ecole polytechnique	11
Ingénieurs stagiaires de 1 ^{re} classe de l'Ecole centrale lyonnaise)	5
Ingénieurs civils des Mines (Paris et Saint-Etienne).....	2
Ingénieurs de l'Ecole de Physique et de Chimie industrielles (Section de Physique)	2
Elèves étrangers diplômés d'écoles techniques supérieures	2
Elèves reçus aux concours antérieurs et divers	9
Elèves reçus au concours de 1921	52
Total.....	225

» IV. *Promotion XXIX (1922-1923).* — a) *Composition de la promotion.* — La promotion actuellement en cours d'études comprend 239 élèves.

» En voici la composition :

Officiers et ingénieurs délégués par l'Etat	47
Ingénieurs des Arts et Métiers	36
Licenciés ès Sciences	32
Ingénieurs des Arts et Manufactures	16
Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique	15
Ingénieurs des Instituts électrotechniques (Grenoble et Toulouse)	14
Elèves étrangers diplômés d'écoles techniques supérieures	7
Ingénieurs stagiaires de 1 ^{re} classe de l'Ecole centrale lyonnaise	4
Ingénieurs de l'Ecole de Physique et de Chimie industrielles (Section de physique)	2
Ingénieur de 1 ^{re} classe du Génie maritime(en congé régulier)	1
Ingénieur civil des Mines. (Saint-Etienne)	1
Ingénieur de l'Ecole supérieure d'Aéronautique et de Construction mécanique	1
Elèves reçus au concours de 1922 (sur 206 candidats) ..	55
Divers	8
Total.....	239

» A ces élèves, il convient d'ajouter 4 auditeurs libres.

» b) *Dispositions matérielles prises pour l'organisation de l'enseignement.* — L'importance de la promotion actuelle étant sensiblement la même que celle de l'an dernier, nous avons encore une fois trouvé auprès de la direction de l'Institut Pasteur l'aide qui nous était indispensable pour l'organisation de notre enseignement oral. La Commission administrative de l'Ecole a, de son côté, décidé d'attribuer à cet établissement une somme égale à celle des années précédentes.

» V. *Relations de l'Ecole avec l'Université.* — Le nombre des étudiants de la Faculté des Sciences inscrits en 1921-1922 aux cours et travaux pratiques du certificat d'électrotechnique générale, a été de 57 ; 12 certificats ont été délivrés en juillet et 3 en octobre.

» Le nombre des auditeurs, en légère progression sur celui de l'année précédente, semble montrer que l'importance de cet enseignement commence à être pleinement appréciée des étudiants.

» VI. *Section de radiotélégraphie. Promotion 1921-1922.* — Conformément à la décision prise par le Conseil de Perfectionnement de l'Ecole, dans sa séance du 18 mai 1921, il a été délivré, à la fin de juin 1922, 15 diplômes d'ingénieurs radiotélégraphistes et 1 certificat d'études de radiotélégraphie.

» *Promotion 1922-1923. — a) Enseignement.* — Aux conférences préliminaires déjà faites l'an dernier, se sont ajoutés, cette année, quatre conférences sur l'appareillage électrique qui ont été confiées à M. Jouvion. Une conférence faite par M. G. Lange, ingénieur des Télégraphes, sur l'emploi de la haute fréquence en téléphonie sans fil a été également introduite dans les conférences sur la téléphonie ordinaire.

» *b) Composition de la promotion.* — La section en cours d'études comprend 54 élèves.

» En voici la composition :

Officiers délégués par le Ministère de la Guerre :

Infanterie	4
Artillerie	3
Aéronautique	2
Génie	1
Infanterie coloniale	1

Officiers délégués par le Ministère de la Marine 9

Officiers délégués par les gouvernements généraux des colonies 2

Ingénieur délégué par le Ministère des Postes et Télégraphes 1

Officiers des gouvernements étrangers (armée, marine) et ingénieurs (*) 15

Elèves civils dont 5 étrangers 16

» Il est à remarquer que cette promotion comprend un nombre relativement considérable d'élèves civils de provenances diverses.

» VII. *Anciens élèves.* — Le nombre total d'anciens élèves ayant passé par l'Ecole (non compris la promotion actuelle) est de :

(*) Classement par nationalités des délégués étrangers à la Section de Radiotélégraphie :

<i>Angleterre</i>	Officier de marine	1
<i>Belgique</i>	Officier de l'armée de terre et ingénieur de télégraphes ..	2
<i>Espagne</i>	Officier de marine et ingénieur des télégraphes	3
<i>Italie</i>	Officier de marine	1
<i>Japon</i>	Officier de marine	1
<i>Pologne</i>	Officier de l'armée de marine	1
<i>Portugal</i>	Ingénieur des télégraphes	1
<i>Tchécoslovaquie</i>	Officiers de l'armée de terre et ingénieur des télégraphes ..	3
<i>Yougoslavie</i>	Officier de l'armée de terre et officier de marine	2

Total 15

2 497, sur lesquels 2 147 ont obtenu le diplôme. Ces derniers se répartissent ainsi :

Officiers et ingénieurs de l'Etat	293
Ingénieurs des Arts et Métiers	297
Licenciés ès-Sciences	273
Ingénieurs des Arts et Manufactures	158
Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique	157
Elèves étrangers diplômés d'écoles techniques supérieures	137
Ingénieurs civils des Mines, etc.	29
Ingénieurs de l'Ecole municipale de Physique et de Chimie industrielles, etc.	22
Ingénieurs de l'Ecole supérieure d'Aéronautique et de Constructions mécaniques et des Instituts électrotechniques de Grenoble, Nancy et Toulouse	17
Elèves reçus au concours et divers	764
Total	2 147

» Le nombre d'anciens élèves brevetés et diplômés de la section de radiotélégraphie est de 210.

» VIII. *Société amicale des Ingénieurs sortis de l'Ecole supérieure d'Electricité.* — L'activité de ce groupement continue à s'exercer avec profit pour le placement de nos élèves et l'aide qu'il apporte à beaucoup de ces derniers en cours d'étude. Nous avons également trouvé auprès de lui le concours le plus entier pour l'œuvre de la reconstruction de l'Ecole supérieure d'Electricité sur laquelle nous pouvons maintenant donner quelques renseignements précis.

» IX. *Reconstruction de l'Ecole supérieure d'Electricité.* — Je rappelle que les études antérieurement poursuivies avaient montré la nécessité de former à côté de la Société française des Electriciens, un organisme auxiliaire destiné à assurer à l'Ecole les ressources matérielles qui lui sont nécessaires. Le Comité d'Initiative, dont je vous ai déjà signalé la féconde activité, décidait l'été dernier de former dans ce but une Société anonyme au capital de 12 000 000 fr qui prendrait le nom de Société pour favoriser le Développement du haut Enseignement de l'Electrotechnique en France (Ecole supérieure d'Electricité).

» La première liste de souscription aussitôt ouverte dépassait au moment des vacances le total de 2 000 000 fr. Elle se montait à 2 681 000 fr au 15 novembre 1922. Elle dépasse actuellement 3 800 000 fr, sans tenir compte de nombreuses et importantes souscriptions qui nous sont dès maintenant promises, mais que des circonstances diverses ne permettent pas encore de considérer comme définitives.

» De son côté, l'Etat français nous a, dès qu'il en a été sollicité, manifesté la plus grande bienveillance. Une conférence interministérielle, réunie en février dernier et à laquelle sept ministères étaient représentés (Instruction publique, Guerre, Marine, Postes et Télégraphes, Travaux publics, Colonies, Finances) a conclu à l'unanimité au dépôt d'un projet de loi portant ouverture d'un crédit de 4 millions de francs à consacrer à la reconstruction de l'Ecole. Ce projet est actuellement déposé au Parlement et tout fait espérer qu'il y recevra bon accueil. D'autres concours des plus efficaces semblent devoir être obtenus de la Ville de Paris ainsi que des Compagnies de chemins de fer français.

» Si donc il peut paraître encore prématuré de parler d'une pleine et entière réussite de cette importante entreprise, du moins y a-t-il lieu d'espérer que quelques mois seulement nous séparent du moment où la société en question pourra se constituer et commencer activement à s'occuper de réaliser ses buts.

» Je me permets, en conséquence, de joindre ma voix à celle de votre président, qui dès le mois de janvier vous demandait, en vous rendant compte des premiers résultats obtenus, de nous prêter le concours le plus absolu, soit par votre contribution personnelle, soit par votre action dans les milieux où elle peut utilement s'exercer. Et s'il était nécessaire de vous donner dans ce but des arguments autres que ceux que votre esprit de solidarité n'ait déjà trouvés, je ne pourrais mieux faire que de vous citer la lettre qu'un de nos principaux souscripteurs écrivait, il y a quelques jours à M. Geoffroy, dont vous connaissez l'inlassable dévouement à notre œuvre :

» Je profite de cette occasion pour vous exprimer les vœux que nous formons pour la réussite d'une entreprise qui, grâce à votre dévouement, sera l'honneur de toute l'industrie française. »

Mis aux voix, ce rapport est adopté à l'unanimité.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

Le texte de la communication de MM. C. Marie et Audubert sur « les phénomènes de surtension dans l'électrolyse et l'influence des colloïdes » sera donné dans un prochain numéro.

RÉSULTAT DES ÉLECTIONS

Le dépouillement du scrutin étant terminé, M. le PRÉSIDENT en proclame les résultats, après avoir remercié les scrutateurs.

RENOUVELLEMENT PARTIEL DU COMITÉ ET DU BUREAU ET DE LA COMMISSION DES COMPTES :

Suffrages exprimés	323
Bulletin nul	1
Nombre de votants	322
Majorité	162

Sont élus :

Présidents d'honneur

MM.	NOMBRE DE VOIX OBTENUES
APPELL, Membre de l'Institut, Recteur de l'Université de Paris	321
Général FERRIE, Membre de l'Institut, Inspecteur des Services de la Télégraphie militaire	322

Président pour l'Exercice 1924-1925

Docteur BROCA (André), Professeur à la Faculté de Médecine	318
--	-----

Vice-Présidents

ROTH (Edouard), Ingénieur en chef des Etudes à la Société alsacienne de Constructions mécaniques	318
PEROT (Alfred), Professeur à l'Ecole Polytechnique	321

Secrétaires

LEMENAND (Raoul), Ingénieur E. S. E., Chef de Travaux au Laboratoire central d'Electricité	322
CARDON (Maurice), Ingénieur de la Marine en congé, hors ca- dre, Ingénieur au Chemin de fer de Paris à Orléans	322

Membres

Pour trois ans

BETHENOD (Joseph), Ingénieur-Conseil	322
CORNUAULT (André), Sous-Directeur de la Compagnie conti- nentielle pour la Fabrication des Compteurs	320
COURTOIS (Gabriel), Ingénieur des Arts et Manufactures, Di- recteur de l'usine des Constructions électriques de la So- ciété industrielle des Téléphones	319
DAVID (Charles), Ingénieur-Conseil, ancien Chef de travaux au Laboratoire central d'Electricité	321
DUVAL (Charles), Ingénieur, Directeur général des Services électriques de la Société générale d'Entreprises	321
GIRAULT (Paul), Ingénieur aux ateliers Thomson-Houston....	322
GUERY (F.), Ingénieur en chef des services électriques de l'Om- nium lyonnais des chemins de fer et tramways	322
JOLY (Louis-Eugène), ancien Vice-Président de la Société fran- çaise des Electriciens	321
LABOUR (Edouard), Ingénieur-Conseil	321
LATOUR (Marius), Ingénieur-Conseil	321
LEGOUEZ (R.), Administrateur des Forges et Ateliers de Cons- tructions électriques de Jeumont	320

MERCIER (E.), Ingénieur de la Marine, Administrateur délégué de l'Union d'Electricité	319
MICHEL (Charles), Directeur de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'usines à gaz	322
PERIDIER (Julien), Ingénieur A. et M., Directeur des Etudes du Contrôle technique à la Société des Transports en Commun de la Région parisienne	322
DE VALBREUZE (Robert), Ingénieur électricien, Administrateur délégué des anciens Etablissements Deberghe et Lafaye	319
ZETTER (Charles), Ingénieur E. C. P., Délégué général du Syndicat professionnel des Industries électriques	320

Pour deux ans

BARILLOT (Albert) , Licencié ès-Sciences, Sous-Chef du Service électrique aux Chemins de fer de Paris à Orléans....	319
CAHEN (Henri), Président du Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique	318

Pour un an

AZARIA, Administrateur délégué de la Compagnie générale d'Electricité	314
---	-----

Commission des Comptes

IMBS, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur général de la Compagnie parisienne de Distribution d'Electricité	320
SCHWARBERG, Directeur général de la Compagnie Electro-Mécanique	320
ULRICH (Jacques), Ingénieur au Corps des Mines en congé hors cadre, délégué de la Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris	321

REVISION DU RÈGLEMENT INTÉRIEUR D'ADMINISTRATION
en vue de la Création d'un poste de Délégué général
de la Société française des Electriciens

Suffrages exprimés	323
Bulletins nuls	56
Nombre de votants ..	267
Majorité	134

PROPOSITION I

	Nombre de voix	
	POUR	CONTRE
Conformément à l'article 7 des Statuts, il est décidé de créer un poste rémunéré de Délégué général de la Société française des Electriciens	257	10

PROPOSITION II

Le Règlement intérieur d'administration est modifié comme suit :

« ART. 28 *bis*. — Le Comité nomme un Délégué général choisi parmi les membres de la Société, qui collabore avec le Secrétaire général et avec le Trésorier dans l'exercice de leurs fonctions.

» Le Comité fixe sa rémunération.

» Le Comité est autorisé à accepter les changements de rédaction qui seraient demandés par le Ministère de l'Intérieur

255 12

Les propositions I et II sont adoptées.

ALLOCUTION DE M. Marcel BRILLOUIN, *Président sortant*

» MESSIEURS,

» Au moment de quitter le fauteuil de la présidence et de rentrer dans le rang, c'est pour moi un devoir agréable de remercier tous les collaborateurs du président annuel, trésorier, secrétaire général, présidents des sections. Quand je ne savais pas encore avec quelle facilité, grâce au dévouement et à l'activité de tous, fonctionne toute l'organisation de la Société des Electriciens, j'étais un peu effrayé de la tâche qui m'était confiée, et je craignais de nuire à la Société par maladresse et incompétence. J'espère qu'il n'en a rien été, parce que tout ce qui exige de la continuité dans les vues, est réellement exécuté par des organes permanents à la tête de chacun desquels se trouve l'homme compétent et capable.

» Je dois vous demander tout d'abord de témoigner votre gratitude au promoteur de la souscription en faveur de la Société pour favoriser le Développement du haut Enseignement de l'Electrotechnique en France (Ecole supérieure d'Electricité), M. Geoffroy, et à votre ancien président M. J. Rey, qui a consenti à continuer l'œuvre mise en train sous sa présidence, dont l'activité et l'influence personnelle assurent le succès rapide.

» La plupart des Sections se sont réunies régulièrement et ont poursuivi des recherches dont le résultat vous sera prochainement apporté. Quelques-unes pourtant ont presque oublié qu'elles existaient, et leur négligence fait ressortir le dévouement des présidents des réunions laborieuses, auxquelles nous sommes heureux d'adresser nos remerciements. C'est au délégué général dont votre Assemblée vient de doter la Société, qu'il appartiendra de rappeler à la vie, par des sollicitations appropriées, celles des Sections qui paraissent manquer de souffle. C'est lui, bien plus que le président annuel, qui par la continuité de son action, réussira à réaliser quelques-unes des améliorations dont nous sentons le besoin, dont nous parlons, mais que nous n'obtenons pas, parce que, pendant quelques mois il faudrait y penser tous les jours, et aussi savoir ce qui est réalisable rapidement, comment, et par qui.

» La publication régulière et rapide de notre Bulletin sera d'abord l'objet de sa sollicitude. Nos conférenciers, que j'ai enten-

— dus avec plaisir et profit, — M. Maurice Leblanc, vient de vous rappeler quels sujets variés et importants ils ont traités devant vous — ne donnent pas toujours leur manuscrit assez vite. Quelques-uns parlent sans avoir arrêté le texte de leur conférence, — ce sont souvent les plus agréables à écouter — et trouvent avec peine le loisir de l'écrire après l'avoir parlée. D'autres l'apportent toute écrite, ou même dactylographiée, et l'illustrent de grands tableaux, de projections, et même quelquefois de cinématographie; alors, ce sont les figures ou tableaux qu'il reste encore à réduire aux dimensions convenables pour l'impression. De toute façon, il est très difficile au Secrétaire général d'obtenir, dès le lendemain, comme il serait désirable, un manuscrit — texte et figures, — à envoyer à l'imprimeur. Il appartiendra au délégué général de proposer au bureau toutes mesures susceptibles d'abréger l'intervalle entre la conférence et la remise du manuscrit complet.

» Il paraît désirable aussi que le Bulletin ne reflète pas seulement l'activité de la Société, mais donne aussi une idée de l'activité des sociétés d'électriciens, soit provinciales, soit étrangères, sans chercher à faire double emploi avec un journal de documentation universelle comme la « Revue générale de l'Electricité ». C'est une besogne extrêmement délicate, qui implique un choix, c'est-à-dire beaucoup plus de travail et de lectures réelles qu'il n'apparaîtra d'articles dans le texte de notre Bulletin. Enfin, il est désirable que le caractère à la fois scientifique et industriel déjà manifesté par l'alternance traditionnelle de vos choix présidentiels, se manifeste aussi dans les informations du Bulletin. Il appartiendra à votre délégué de choisir dans les journaux scientifiques de tous pays les travaux qui, malgré leur caractère exclusivement scientifique, peuvent prendre une importance industrielle, et de fournir aux inventeurs ou aux chefs d'industrie tantôt une brève analyse et une référence, tantôt un extrait étendu.

» J'ajoute que l'information inverse serait accueillie avec reconnaissance par les chercheurs scientifiques purs. Les ingénieurs reprochent volontiers aux savants de parler un langage énigmatique, et de ne pas traduire leurs résultats en langue vulgaire, claire pour tout le monde. Croyez bien que la balle peut être échangée — espérons que ce ne sera pas sans résultat — et que, si beaucoup de savants se désintéressent de l'industrie, c'est que le langage technique n'est pas pour eux plus clair que le langage mécanique, par application des lois d'Ampère, en parlant des

courants de pile, était trop coûteuse pour être utilisée à autre chose que la télégraphie ; sans la découverte de l'induction par gage symbolique pour beaucoup d'industriels. Bien souvent, des progrès scientifiques sérieux sont devenus possibles parce que l'industrie a fourni à des prix abordables et à autant d'exemplaires que l'on voulait, de véritables instruments de précision. Encore faut-il le savoir, et c'est ce que les catalogues d'exposition nous font soupçonner de temps en temps. Nous aimerions être mieux renseignés sur les méthodes et appareils qui peuvent utilement passer du laboratoire d'essais ou de l'usine au laboratoire de recherches.

» Je vous citerai un exemple de ces progrès scientifiques stupéfiants, dû à l'emploi au Laboratoire de Leyde des machines industrielles de liquéfaction des gaz par détente. C'est parce qu'il a pu acheter des batteries de machines de Linde, et parce que ces machines travaillent à peu près également avec tous les gaz, sans en altérer la pureté, que M. K. Onnes a pu atteindre il y a plus de dix ans la température de $1/269^{\circ}$ (4° absolus) au-dessous de laquelle le plomb, le mercure, etc., deviennent subitement des millions de fois plus conducteurs qu'à 6° ou 7° absolus. Un courant produit par induction n'y dégage plus de chaleur, et se maintient pendant des minutes ou même des heures (0,4 ampère sans diminution appréciable au bout de 3 heures, dans du plomb à $1^{\circ}7$ absolu).

» Voilà une découverte qui, au moins au point de vue de la théorie de la conductibilité des métaux, est d'une importance inappréciable ; et qui, lorsqu'elle sera interprétée correctement, ne peut manquer d'avoir des conséquences pratiques, même aux températures ordinaires. Aux dernières nouvelles, M. K. Onnes a même atteint $0,9$ absolu ; il y a donc désormais, tout un domaine de températures accessibles (à quel prix comme argent et labeur !) pour l'étude de cet état supraconducteur des métaux. A quand le froid à prix réduit ?

» La découverte de la supraconductibilité est industriellement incomplète ; est-ce une raison pour la dédaigner ? C'est d'ordinaire la réunion de plusieurs découvertes scientifiques indépendantes, qui peut donner naissance à une puissante industrie. L'électricité nous en fournit la démonstration. L'importance industrielle de l'invention de la pile par Volta, restait minime sans la découverte des lois de l'électrolyse par Faraday, et la mise au point de l'accumulateur, par Planté. La production de travail

Faraday, la puissante industrie électrique que nous commençons à connaître ne pouvait pas voir le jour.

» C'est donc de l'association de deux ou trois découvertes scientifiques indépendantes que provient la naissance de cette industrie d'une si grande importance économique. Mais comment ne pas s'étonner qu'il ait fallu cinquante ans (de 1832 à 1881 environ), pour que l'adaptation se produise. Si étonnante qu'elle ait paru, la machine Paccinotti-Gramme aurait pu être inventée dès 1833 ou 1834. Mais le public n'en avait pas besoin, on n'aurait su à quoi l'employer. Pour l'essor de l'industrie électrique, il fallait encore quelque chose, une invention, ne mettant en jeu aucune nouveauté scientifique comparable aux géniales découvertes d'Ampère et de Faraday, mais très remarquable néanmoins, celle de la lampe à incandescence dans le vide et de sa fabrication économique en série, par Edison.

» Il faut donc un groupement de découvertes pour donner naissance à une industrie — physique — importante.

» Et voilà maintenant la conséquence que j'en veux tirer. Il est tout à fait vain de demander la collaboration directe de la plupart des savants avec les industriels. Ni les industriels ne savent ordinairement poser les questions aux savants, ni les savants y répondre. L'un sait bien ce dont il a besoin, l'autre sait bien ce qu'il peut chercher avec chance de succès, et il y a presque toujours un gouffre entre le désir de l'un et la puissance de l'autre. Il faut une classe d'hommes intermédiaires, les ingénieurs instruits, — les membres de notre Société, par exemple.

» Le rôle industriel des savants sera de leur fournir le fonds de cette instruction, et, si possible, de le renouveler par leurs découvertes. Sans quelques savants de génie, Volta, Ampère, Faraday, pas d'industrie électrique. Mais donnez à Ampère un atelier de construction, une équipe d'ouvriers et de contremaîtres, ouvrez-lui un compte courant inépuisable — faites de même avec Faraday — et soyez sûrs, ou à peu près, qu'il n'en serait sorti aucune industrie. Leur esprit était trop constamment absorbé par la curiosité proprement scientifique, la recherche de lois primordiales de la physique, pour s'attacher longtemps et avec ténacité à des applications et à leur réalisation industrielle.

» C'est le travail de recherche purement scientifique qu'il faut demander au savant, et qu'il faut l'aider à accomplir en lui fournissant des ressources suffisantes, en argent et en collaborateurs. Mais laissez-le libre de choisir son sujet de recherche, celui qui

le passionné, et qu'il se sent capable de traiter. Personne ne peut savoir si le résultat qui semble aujourd'hui profondément indifférent et inutile aux esprits pratiques, ne deviendra pas, après-demain, par association avec un ou deux autres du même genre, la source d'importants progrès industriels et économiques. Personne ne peut savoir dans quel laboratoire, par quel chercheur, à un court moment de sa vie, seront obtenus les résultats les plus fructueux. Limiter les subventions aux laboratoires et aux savants actuellement utiles à l'industrie, serait une lourde faute. Qui était plus chimérique qu'Ampère, aux yeux des grands bourgeois de la Restauration ? Qui, sauf Arago, aurait songé à lui obtenir quelque subvention, avant 1820 ? Et d'ailleurs, quelle œuvre excellente, mais pas plus, auraient laissé Volta sans Galvani, Ampère sans Ersted, et qui peut deviner quand jaillira la petite étincelle, et où elle allumera un foyer rayonnant ?

La subvention intelligente sera donc la subvention largement répandue, celle qui atteint un grand nombre de chercheurs laborieux et instruits, et qui seule, a chance d'être à la disposition du génie vraiment créateur, au moment où il s'éveille.

Mais j'oublie que vous attendez avec quelque impatience la fin d'une séance déjà longue, et par conséquent la fin de ma présidence. Je reprends volontiers la liberté de choisir une chaise mieux placée pour entendre et surtout pour voir, que n'est le fauteuil du président, et j'en cède l'usage au très sympathique M. Eschwège. Avec lui, vous aurez un Président qui connaît très bien tous les besoins de la Société et qui l'a déjà prouvé en nous proposant il y a quelques mois la création de ce poste de délégué général, que votre assemblée vient de décider par un vote unanime, et en trouvant l'homme éminent et dévoué, dont le nom n'est un secret pour personne ici. Soyez assurés que, au cours de son année de présidence, M. Eschwège verra avec une égale netteté et trouvera avec une égale aisance tout ce qui peut être utile au développement de la Société française des Electriciens. L'année 1923-24 comptera dans la vie de la Société.

M. Eschwège prend place au fauteuil de la présidence et remercie ses collègues de l'honneur qu'ils lui ont fait en l'appelant à la présidence de la Société. Il les assure de tout son dévouement et rappelle les travaux éminents de M. Brillouin.

La séance est levée à 22 h. 45.

INFORMATIONS

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

ASSOCIATIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

RÉUNION DU CONSEIL GÉNÉRAL DU 20 AVRIL. — Dans cette réunion tenue à Milan sous la présidence de l'Ingénieur Del Buono, le Conseil a décidé de tenir le prochain Congrès dans la deuxième quinzaine d'octobre et d'y discuter les applications de l'énergie électrique.

Une vive discussion s'est élevée ensuite sur le nouveau décret pour la concession des lignes électriques de transport et de distribution. Un ordre du jour a été voté pour réclamer que l'Association soit nécessairement consultée toutes les fois qu'une disposition législative concernant l'électrotechnique est en préparation.

RÉUNION DU GROUPE DE MILAN DU 1^{er} MARS 1923. — Dans cette réunion présidée par M. Semenza, a été discutée la communication faite par M. l'ingénieur Campos à la séance précédente, sur les transformateurs de mesure dans l'exploitation des stations centrales.

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ORDINAIRE DU GROUPE DE MILAN, DU 23 MARS 1923. — Le Président fait approuver les comptes.

Le budget de 1922 s'élève à 84 000 liras.

L'actif est à ce jour, de 39 212,23 liras.

L'Assemblée vote ensuite, à l'unanimité, une modification au règlement permettant aux membres de voter par correspondance et élit par acclamation les remplaçants des membres sortants du Conseil.

RÉUNION DU GROUPE DE BOLOGNE EN FÉVRIER. — Le 18 février, le Groupe a visité une installation des Tramways Urbains.

Le 25 février, à propos de la question mise en discussion par le Groupe de Milan « Continuité et régularité de l'exploitation dans les stations électriques », M. Sartori examina la répartition de la puissance active et de la puissance réactive dans un groupe de stations centrales interconnectées par de grandes lignes pour alimenter de vastes régions. L'exemple choisi était la partie orientale de la haute Italie.

A la séance du 25 mars du même Groupe, l'ingénieur Righi, président, mit en discussion la question de l'électrification des campagnes.

Cette discussion fut continuée à la séance du 8 avril dans laquelle l'ingénieur Giandotti lut une communication établissant un parallèle entre les bassins de production et les bassins d'utilisation d'énergie hydroélectrique.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Génératrice d'induction excitée par des condensateurs

Par H. Sordina (Elettrotecnica, 15 mai 1921)

On sait qu'un moteur asynchrone peut fonctionner en génératrice de courant alternatif s'il est entraîné à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, et est relié à un alternateur synchrone qui lui fournit le courant magnétisant à la fréquence de service. Dans le présent article, l'auteur rend compte des résultats d'expériences effectuées avec une génératrice d'induction alimentée en courant magnétisant par des condensateurs placés en dérivation sur ses bornes. Quand le rotor fut mis en marche par un moteur auxiliaire, on observa que l'excitation commençait subitement, à une certaine vitesse, dépendant de la capacité des condensateurs. L'auteur démontre que cette autoexcitation est due au magnétisme rémanent du rotor. On employa pour les expériences une machine à courant triphasé de 2,21 kilowatts, 260 volts, 50 périodes par seconde. Trois séries de condensateurs furent placées en dérivation aux bornes, la capacité de chacune de ces séries étant de 23 microfarads. Les courbes caractéristiques de la machine sont analogues à celles d'une dynamo shunt à courant continu : quand la résistance extérieure diminue, la différence de potentiel diminue, lentement d'abord, puis rapidement; le courant croît jusqu'à un maximum et diminue ensuite rapidement; au-dessous d'une valeur donnée de la résistance extérieure, l'excitation de la machine tombe. Il est intéressant de noter que la fréquence ne reste pas constante quand la vitesse demeure constante; aussi, pour obtenir une fréquence constante quand la résistance extérieure diminue, le nombre de tours doit-il être augmenté. En ce cas, le glissement croît, au début, presque en ligne droite, et tend ensuite à rester constant.

L'autoexcitation de la machine dépend du magnétisme rémanent du rotor; en conséquence, selon la quantité de ce magnétisme, l'autoexcitation commencera à des vitesses différentes, et quelquefois elle n'aura pas lieu du tout. Il sera alors nécessaire d'aimanter au préalable la machine en faisant passer un courant continu dans les enroulements du stator ou du rotor, afin de produire l'autoexcitation. La courbe de la force électromotrice engendrée, obtenue à l'aide d'un oscillographe, fut reconnue pratiquement sinusoïdale, mais l'amplification de la courbe révéla une ondulation légère et périodique, attribuée, par l'auteur, aux différentes positions du rotor, par rapport au champ tournant du stator : positions dépendant du glissement. Contrairement au cas général, la courbe de la force électromotrice présente donc, ici, des harmoniques qui ne sont pas des multiples exacts de la fréquence fondamentale.

Dans le cas particulier des expériences, les harmoniques supérieurs avaient une fréquence de 5,3 à 5,5 fois celle de la fréquence fondamentale, ce qui dépend du glissement.

Nouveau système de lignes d'alimentation pour traction à courant continu

Par E. Sorelli (Elettrotecnica, 15 mai 1921)

Pour obtenir une tension constante dans les lignes des tramways et des chemins de fer électriques, on emploie des sous-stations, lesquelles présentent l'inconvénient d'être très coûteuses. L'auteur propose d'éliminer ces sous-stations et d'alimenter les lignes en certains points distants, à un régime de sur-tension convenable, au moyen de feeders reliés aux dynamos fournissant la tension surélevée, dynamos placés dans la station centrale. Les frais d'installation comparatifs des systèmes ancien et nouveau sont examinés. Les résultats d'expériences effectuées sur des lignes existantes sont représentés sous forme de diagrammes et ils montrent qu'avec la nouvelle méthode, la tension de ligne est plus constante qu'avec le système, plus onéreux, des sous-stations.

Chute de tension des autotransformateurs et des régulateurs d'induction.

Par C. della Salla (Elettrotecnica, 25 juin 1921)

Dans la littérature technique, nombreuses sont les méthodes de calcul de la chute de tension des transformateurs ordinaires, mais celles relatives au même calcul dans le cas des autotransformateurs et des régulateurs d'induction font presque totalement défaut. D'où la raison d'être du présent article. L'auteur

suit la même méthode que pour les transformateurs ordinaires. Les autotransformateurs survolteurs et dévolteurs à enroulements simples ou à enroulements supplémentaires de même sens ou de sens opposé, ainsi que les régulateurs d'induction monophasés et triphasés, sont examinés, et leurs chutes de tension sont déterminées. Les différences caractéristiques de fonctionnement entre les transformateurs ordinaires et les autotransformateurs sont mis en évidence.

Equations des courbes caractéristiques des dynamos.

Par C. Matteini (Elettrotecnica, 15 juin 1921)

Supposant que la réaction du rotor sur le champ magnétique soit proportionnelle au courant du rotor, et que la résistance intérieure soit constante, l'auteur démontre que les courbes caractéristiques des dynamos à excitation série et à excitation shunt peuvent être représentées par des hyperboles. Des expériences effectuées sur ces types de dynamos montrent que, pour les dynamos shunt en particulier, les courbes théoriques et pratiques coïncident raisonnablement.

Propriétés magnétiques du fer pulvérisé et comprimé

Par B. Speed et G.-W. Elmen (Amer. Inst. Elect. Eng., juillet 1921)

Ce mémoire décrit une substance magnétique particulièrement appropriée à la construction des noyaux des bobines de charge et des transformateurs, tels que ceux employés dans une installation téléphonique. Les conditions à satisfaire pour une substance destinée aux noyaux de cette sorte, sont : une perméabilité sensiblement constante, une faible perte par hystérésis, enfin une faible perte par courants de Foucault, et ceci pour l'amplitude des forces magnétisantes et des fréquences usuelles en téléphonie. La substance préparée industriellement pour satisfaire à ces exigences, consiste dans un fer déposé électrolytiquement, pulvérisé en grains fins, lesquels sont ensuite isolés (à la gomme laque), et enfin comprimés sous une pression de $1,4 \times 10^4$ kg : cm². La méthode de fabrication est décrite et représentée par des photographies prises sur les lieux de production. Des tableaux et des courbes montrent les propriétés magnétiques, électriques et mécaniques de la substance. La plus grande perméabilité obtenue fut d'environ 500. La résistance spécifique est d'environ 50 à 60 fois celle du fer ordinaire, et la résistance à la traction est d'environ 100 kg : cm². A une fréquence de 800 périodes par seconde, la perte dans la substance, due à l'hystérésis, est cinq fois celle due aux courants de Foucault.

Le fonctionnement des moteurs asynchrones sous des tensions et des fréquences variables, par E. Carlevaro (Elettrotecnica du 5 juillet 1921).

Il arrive parfois que des moteurs asynchrones sont alimentés dans des conditions de tension et de fréquence qui diffèrent de celles pour lesquelles ils furent calculés. Ces conditions se présentent, par exemple, lorsque la station centrale est surchargée, de telle sorte que le nombre de tours des alternateurs diminue. L'auteur considère deux cas : premièrement, celui de la charge constante ; deuxièmement, celui du couple constant. Les expériences portèrent sur deux moteurs : l'un de 8 kw, 150 volts, 40 p. s., avec rhéostat de démarrage dans le rotor ; l'autre de 1 kw, 260 volts, 42 p. s., avec rotor à cage d'écureuil. Les données expérimentales ainsi obtenues furent utilisées pour tracer les diagrammes circulaires de Grob pour différentes tensions et fréquences, d'où furent tirés des diagrammes cartésiens pour les courants primaires, pour le facteur de puissance et les rendements, pour des charges et des couples constants et pour diverses tensions ou fréquences. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme il suit. 1° Quand le moteur est soumis à la charge maximum, si la tension diminue, le courant et le facteur de puissance augmentent ; par contre, la vitesse de rotation et le rendement diminuent. Le moteur se met à chauffer. 2° Quand le moteur est soumis à la charge maximum, si la fréquence diminue, le courant augmente sensiblement, le glissement diminue un peu, tandis que le facteur de puissance et le rendement ne varient pas. La température du moteur augmente énormément. 3° Quand le moteur est soumis au couple maximum, une diminution de la fréquence produit une légère augmentation du courant et une légère diminution du glissement et du facteur de puissance. Pour

des charges ou des couples plus faibles, les conditions diffèrent un peu de celles de la pleine charge ou du couple maximum. La conclusion est que les cas désavantageux sont ceux d'une diminution de tension à pleine charge et d'une diminution de la fréquence aux faibles charges.

Essais sur une ligne de transmission d'énergie

Par W.-W. Lewis (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1921)

L'auteur rend compte de certains essais effectués sur le système à 110 000 volts, 30 p.s., de la « Consumers Power Co » (Michigan), pour déterminer la perte par effet de couronne sur une ligne de transmission de 165 km de longueur. Les détails relatifs à la ligne, ainsi qu'un tableau des constantes, figurent dans le mémoire. Les appareils employés pour les essais furent des voltmètres, des ampèremètres et des wattmètres portatifs étalonnés, ainsi que des transformateurs de potentiel et d'intensité étalonnés, provenant du Laboratoire de Schenectady. En certains cas, on eut recours à des transformateurs de station. Les lectures des wattmètres furent corrigées de l'angle de déphasage. On voit, d'après les chiffres obtenus, comment l'élévation de la température, et aussi la pluie, augmentent les pertes par effet de couronne. Des oscillogrammes montrent que la tension et l'intensité du neutre (à la terre) sont de fréquence triple de la tension et de l'intensité de la ligne, ce qui est attribué à l'effet de couronne. Les comparaisons entre les pertes par effet de couronne, calculées et mesurées, sont représentées par des courbes qui, tout en offrant une très grande similitude en général, présentent quelques différences marquées, notamment à la partie inférieure des courbes : les courbes mesurées indiquant une perte plus faible et une inflexion plus brusque que les courbes calculées. La conclusion à tirer de tous les essais est qu'il est désirable de faire fonctionner les lignes de transmission au-dessous de la tension produisant l'effet de couronne, afin d'éviter la perte due à ce phénomène.

La régulation de la fréquence employée dans des buts de mesure,

par B.-H. Smith (Amer. Inst. Elect. Eng., février 1921).

L'auteur communique des détails relatifs à un mode d'emploi de la fréquence comme indication quantitative. Le cas se présente, — tel celui envisagé ici, — où, dans des buts de contrôle, il est nécessaire d'obtenir et d'enregistrer des indications de débit en différents points. La fréquence d'un circuit peut être rendue proportionnelle à l'indication requise, et être transmise, sans altération, à une distance quelconque, le courant d'arrivée servant à actionner un moteur synchrone, dont la vitesse peut être déterminée. L'auteur décrit, tout au long, un exemple d'application sur le Chicago, Milwaukee and St Paul Railroad, où, au point de contrôle, il est nécessaire de connaître à tous moments le débit d'un certain nombre de sous-stations. A la première sous-station, un petit moteur synchrone est actionné par une génératrice à courant alternatif et, au moyen d'un aimant tournant, agissant sur un disque en aluminium, il produit un couple qui, sur une vaste amplitude, est proportionnel à la vitesse. Ce couple est équilibré avec le wattmètre et maintenu de telle sorte que tout changement dans l'indication du wattmètre détermine un changement de la vitesse. La fréquence de base, correspondant à la charge zéro, est de 25 p.s., de sorte que, si la charge est zéro, une fréquence de 25 p.s. est transmise à la station la plus proche, et, selon les différentes charges, la fréquence est augmentée jusqu'à un maximum de 60 p.s. La fréquence de départ, à 100 volts environ, est transformée à 2000 volts et transmise à la station la plus proche. A chaque station traversée par le courant, la fréquence est augmentée d'une quantité proportionnelle à l'énergie reçue à cette station. Ainsi, la fréquence est utilisée dans des buts de mesure.

D'autres applications de la même méthode à des buts analogues, sont décrits dans la mémoire qui, de plus, contient divers schémas de montage des appareils nécessaires, et quelques vues photographiques.

Transformateurs électrostatiques et coefficients d'accouplement,

par F.-C. Blake. (Amer. Inst. Elect. Eng., janvier 1921).

Le problème de l'accouplement électrostatique de deux circuits oscillants est ici traité, en utilisant les équations de Rayleigh et la notion d'« élastance », cette grandeur étant définie comme l'inverse d'une capacité, et par conséquent

mesurée par la réciproque du farad, le « daraf ». Il est démontré que l'élastance effective d'un circuit est fonction, non seulement de son élastance propre, de l'élastance des circuits voisins et de leur élastance mutuelle, mais aussi de leurs inductances propres et mutuelles. Et il est démontré, en particulier, que, au delà d'une certaine fréquence, l'élastance effective, au lieu d'augmenter avec la fréquence, diminue généralement, ce qui est dû à ce que la valeur du rapport de la réactance à la résistance s'élevant constamment, l'élastance effective atteint finalement le minimum donné par la disparition des termes comportant une dissipation d'énergie. La vérification des formules a été effectuée en opérant avec les systèmes Lecher. L'auteur explique par la théorie des circuits à accouplement élastique, l'action récupératrice de l'ultratron de Forest, car là il y a accouplement élastique, entre grille et plaque, plaque et filament, et grille et filament.

Analyse harmonique des ondes complexes : un analyseur électrique,
par F.-S. Dellenbaugh, Jr. (Amer. Inst. Elect. Eng., février 1921).

Ce mémoire décrit un analyseur électrique basé sur la méthode d'analyse graphique. Des diagrammes et des détails sont fournis : (1), pour un analyseur donnant les 1^{re}, 3^e et 5^e harmoniques ; (2), pour un analyseur donnant les harmoniques impairs jusqu'à 11^e. La méthode est d'une conduite facile, d'une exactitude passable et d'une très grande rapidité ; elle permet la lecture des coefficients, soit en valeurs réelles, soit en pourcentage de la composante fondamentale. Toutefois, elle est exposée aux limitations inhérentes à la méthode graphique, ainsi qu'aux difficultés propres aux réseaux électriques. Autre inconvénient : le nombre de résistances nécessaires augmente rapidement avec l'ordre des harmoniques.

Le mémoire se termine par une importante bibliographie des publications relatives à l'analyse harmonique.

Matériel de conversion utilisé dans les sous-stations d'énergie,
par T.-F. Barton et T.-T. Hambleton (Amer. Inst. Elect. Eng., mars 1921).

Dans ce mémoire, sont discutés les avantages relatifs de la commutatrice synchrone à survolteur, de la commutatrice à réglage par le champ, de la commutatrice-motrice ou « dynarotor », enfin du moteur-générateur, cette étude ayant particulièrement en vue les exigences de la régulation de la tension dans de certaines limites. Des courbes caractéristiques et des oscillographies relatives à la pratique la plus moderne accompagnent le mémoire. Par rapport à la commutatrice synchrone à survolteur, la commutatrice à réglage par le champ présente les avantages suivants : rendement plus élevé, commutation meilleure, ventilation meilleure aussi et facilité d'accès, prix moins élevé tant que l'amplitude de variation de la tension n'excède pas 5 pour 100 ; enfin, moindre encombrement. Par contre, la commutatrice synchrone à survolteur offre des avantages en ce qui concerne les conditions du facteur de puissance, et elle se prête à une grande amplitude de tension. La commutatrice-motrice comporte des limitations dans les tensions pour lesquelles elle peut être construite, mais son rendement industriel est un peu plus élevé que celui de la commutatrice synchrone à survolteur, avec transformateurs et connexions, plus élevé également que celui du moteur-générateur, mais plus faible que celui de la commutatrice à réglage par le champ avec transformateurs. L'auteur entre dans quelques détails sur les méthodes de démarrage des commutatrices par le courant alternatif. Parmi les diverses méthodes considérées, celle par étoile-triangle est, sinon la meilleure, du moins la plus économique. Des oscillographies relatives au démarrage par diverses méthodes illustrent le texte. Les propriétés des moteurs-générateurs sont examinées assez longuement et il est constaté qu'en général le rendement du moteur-générateur à pleine charge est inférieur d'environ 2 pour 100 à celui de l'équipement de la commutatrice synchrone à survolteur, et, à demi-charge, d'environ 5 pour 100 environ. En ce qui concerne l'encombrement, il y a à peu près égalité pour la puissance de 1 000 kw ; aux puissances plus faibles, l'encombrement est moindre pour le moteur-générateur, et aux puissances plus élevées, l'avantage revient à la commutatrice. Au-dessus de 1 500 kw, et en groupe de trois unités, le moteur-générateur est meilleur marché et son rendement plus élevé. En terminant, l'auteur dit quelques mots en faveur de la commande automatique des sous-stations.

déclarer qu'il accepte les H. et C. et qu'il est responsable de son comportement. Il est élu président de la Société. Le secrétaire général est élu M. Picou. Le trésorier est élu M. Carpentier. Le directeur est élu M. Billairet. Le directeur adjoint est élu M. Picou. Le directeur adjoint est élu M. Picou. **IL Y A TRENTÉ ANS** que la Société est fondée. Elle a pour but de faire connaître les progrès de la physique et de la chimie. Elle a pour but de faire connaître les progrès de la physique et de la chimie. Elle a pour but de faire connaître les progrès de la physique et de la chimie.

Assemblée générale ordinaire. — M. Raymond succède, comme président, à M. Carpentier et M. Billairet, comme secrétaire général, à M. Picou.

Pour la première fois, par suite d'une convention passée avec l'Etat, les recettes de 12 442.10 fr. et les dépenses de 10 682.75 fr. du Laboratoire central d'Electricité, figurent dans les comptes de la Société.

L'assemblée approuve cette convention à l'unanimité, ainsi que celle passée avec la ville de Paris pour l'installation du Laboratoire rue de Staël.

Communications techniques et communications diverses. — M. Guillaume, dans une communication sur « Les idées modernes sur la théorie des grandeurs électriques », rappelle le système de Maxwell et expose ceux d'Ostwald, de William et de Rüchke.

M. Peyrusson décrit un accumulateur du type Planté qu'il a réalisé, et qui rend 10 ampères par mètre carré et 10 ampères-heure par kilogramme.

MM. Blondel et Boucherot, poursuivant la discussion sur le programme du Congrès de Chicago, échangent des idées à propos des définitions à adopter pour la self-induction et l'inductance.

M. Carpentier, président sortant, donne un aperçu des négociations avec la ville de Paris qui ont abouti à la convention pour l'installation du Laboratoire. Il souligne la part prépondérante qu'a prise M. Mascart, Quêteur général de la Société, au lancement de la souscription dont le produit, qui a atteint 100 000 fr., a permis d'exécuter les constructions du Laboratoire.

Le Gérant : J. Guyot.

Imprimerie de M. HENRIOT, 20, rue Germain, Paris. — Téléphone 100. — Adresse postale 100. — Adresse postale 100.

NOV 6 1923

Engineering
Library

OME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 25.

MAI 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société, reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en **France**

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu
et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

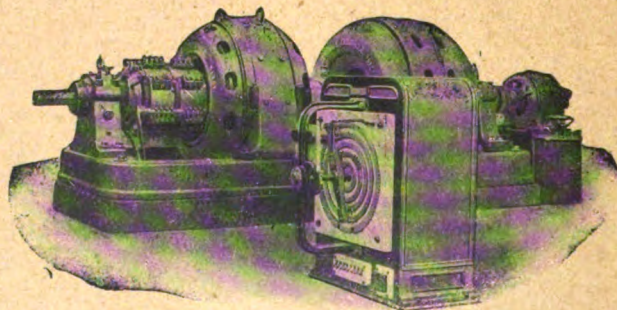
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : **NANCY, Rue Oberlin**

Usines à : **NANCY, NANTERRE NANTES**

Maison à **PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)**



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 2 mai 1923 : Admission de membres titulaires, p. 209. — Dons à la Société, Ecole et Laboratoire, p. 210. — Allocution de M. le Président, p. 210. — Sur les accumulateurs électriques, (M. Nissou), p. 213 — L'éclairage artificiel des studios (M. Bossu), p. 227.

Informations, p. 241.

Bibliographie, p. 244.

IL Y A TRENTE ANS, p. 248.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 2 mai 1923 (1)

Présidence de M. P. ESCHWEGE

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Boy (Maurice-Mathieu), capitaine, chef des services électriques et radiotélégraphiques, Inspection technique de l'Aéronautique, 33, rue du Commerce, à Paris (15*). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Chalus (de) (René-Marie-Henri-Raymond), assistant au Laboratoire central d'Electricité, 13, rue Pétel, à Paris (15*). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Chatel (William), chef d'atelier à la Société d'Installation Electro-Mécanique, 44, place de l'Eglise, à Pantin (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Guillet (Léon), directeur de l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, président de la Société des Ingénieurs civils, 1, rue Montgolfier (3^e), à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Ladroltte (Edmond-Jules), capitaine d'artillerie, élève à l'E. S. E., 4, rue de la Barre, à Vitry-sur-Seine (Seine).

Lebret (Gaston-Henri), directeur technique de la Société industrielle pour la Fabrication d'Appareils de Mesure, 48, boulevard de Vaugirard, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et Lebaupin.

Lefrand (Edouard-Eugène), préparateur au Conservatoire national des Arts et Métiers (Chaire d'Electrotechnique industrielle), 381, rue de Vaugirard, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et Chaumat.

Martin (Gérard), ingénieur électricien aux Etablissements Bouillet, 16, rue de l'Avre, à Paris (15^e). — Présenté par MM. Aubert et Villiers.

Santos (José-Carlos), ingénieur, ru Barata-Salguero, 54, à Lisbonne (Portugal). — Présenté par MM. Detroyat et Maurice Leblanc fils.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. LE PRÉSIDENT fait part des dons suivants :

Ecole et laboratoire, de la Maison J. Carpentier; Réparations de divers appareils de mesure.

M. LE PRÉSIDENT prononce l'allocution suivante :

Allocution de **M. le Président**

MES CHERS COLLÈGUES,

» Une tradition, aussi vieille que notre Société, veut que la présidence en soit tour à tour exercée par un savant et par un industriel.

» Certains des derniers présidents que vous avez élus comme industriels avaient un tel bagage scientifique, que vous avez pu croire la tradition abandonnée.

» Il n'en est rien. Quelle meilleure preuve en pourrais-je donner que ma présence à ce fauteuil après M. Brillouin, avant M. Broca ?

» Cette tradition correspond d'ailleurs aux principes mêmes qui ont guidé les fondateurs de la Société française des Electriciens ; notre Société n'est pas seulement une Société savante, elle a pour objet de rapprocher tous ceux qu'intéresse l'électricité.

» C'est à leur étroite et cordiale collaboration que sont dus la brillante carrière de la Société et le succès de ses principales créations, le Laboratoire et l'Ecole, qui suffiraient à lui assurer, si elle n'y avait en même temps d'autres titres, une réputation mondiale auprès de tout ce qui touche à l'électricité.

» Jetons ensemble, si vous le voulez bien, un rapide coup d'œil

sur quelques questions actuellement à l'ordre du jour des travaux du Comité ; vous verrez qu'elles soulèvent des problèmes d'ordre administratif, juridique ou financier qui, pour n'être pas étrangers aux savants, sont plus familiers cependant aux industriels et expliquent la part que ceux-ci occupent dans la gestion de la Société.

» Le Laboratoire et l'Ecole étouffent depuis longtemps dans un cadre commun trop étroit, dont le dernier ajustement remonte à quinze ans — un siècle en électricité ; — ce cadre est maintenant inextensible.

» Leur séparation s'impose donc ; elle aurait continué sans doute à s'imposer pendant plusieurs années encore si nos dévoués collègues MM. Geoffroy, Janet et Rey, n'avaient pris courageusement la question en mains et entrepris la belle campagne que vous connaissez, pour fournir à l'école un cadre moderne, digne du remarquable enseignement de M. Janet et de ses distingués collaborateurs.

» S'attaquant à tous ceux dont le concours semblait utile, nos collègues ont tout d'abord intéressé à l'œuvre commune les électriciens, qu'aucun progrès ne laisse jamais indifférents.

» Ils ont ensuite abordé les pouvoirs publics, et l'accueil qu'ils en ont reçu, montre en quelle estime sont tenus les services rendus par l'Ecole.

» Quelques mois d'efforts encore et nous pourrons mettre le point final à notre souscription ; quelques formalités à remplir ensuite et mon successeur aura sans doute la grande joie, que je lui envie, de présider à la pose de la première pierre des nouveaux bâtiments.

» Le Laboratoire, héritier des locaux actuels de l'Ecole, pourra alors respirer à l'aise et nous aurons à adapter ses installations à l'étude des problèmes nouveaux que pose chaque jour une industrie en continuel progrès.

» Mais, comme vous l'a récemment indiqué le Comité en vous soumettant son projet de création d'un poste de délégué général, d'autres questions encore nous préoccupent.

» Il nous faut recruter de nouveaux adhérents ; que sont nos douze cents membres, en regard de ce que la France seule compte de savants, de professeurs, d'industriels, d'amis de l'électricité, alors qu'il n'est presque plus de branche de l'activité humaine qui ne fasse appel à l'électricité ?

» Nous aurons en même temps à vivifier le Bulletin et les Sections pour la plupart engourdies d'un trop long sommeil.

» Nous aurons à établir des relations régulières avec les associations similaires de l'étranger, à veiller à ce que d'intéressantes communications soient offertes aux fidèles assistants de nos réunions mensuelles.

» Votre Comité, si actif soit-il, n'est donc pas près de chômer faute de besogne ; aussi vous est-il reconnaissant de lui avoir facilité sa tâche en le dotant d'un délégué général, organisme permanent de liaison entre vos Présidents de passage.

» M. Grosselin, ancien secrétaire général et ancien Président, a bien voulu accepter d'occuper cette fonction ; il nous a donné là une nouvelle preuve de la vive affection qu'il a vouée depuis longtemps à notre Société ; je l'en remercie sincèrement en votre nom.

Mes chers Collègues, en inscrivant mon nom sur la liste de vos Présidents, véritable palmarès de l'électricité, vous m'avez fait un honneur dont je sens tout le prix, vous m'avez en même temps créé des devoirs auxquels je ne me soustrairai pas.

» J'espère, grâce au concours d'un personnel d'élite dont le dévouement ne s'est jamais démenti, faire entrer dans la voie de la réalisation, quelques-uns des projets que je vous ai rappelés et réussir à ne pas laisser dans l'histoire de notre chère Société le souvenir du plus inutile des Présidents.

L'ordre du jour appelle les communications techniques :

SUR LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

M. NISSOU. — « Nous voulons vous donner un aperçu rapide sur l'évolution qui s'est produite ces dernières années en matière d'accumulateurs électriques.

» A l'heure actuelle, deux genres d'accumulateurs sont utilisés industriellement :

- » L'accumulateur au plomb.
- » L'accumulateur nickel-fer.

ACCUMULATEUR AU PLOMB

» Vous savez qu'il est constitué par deux groupes d'électrodes au plomb ou à base de plomb avec, comme électrolyte, l'acide sulfurique étendu.

» Jusqu'en 1919, le processus de fonctionnement généralement admis était celui de la double sulfatation exposé en 1882 par Gladstone et Tribe, et qui se résume ainsi :

» A la décharge, formation de sulfate de plomb sur les deux plaques ;

» A la charge, transformation du sulfate de plomb en bioxyde de plomb à la positive, en plomb réduit à la négative.

» Cette théorie a subsisté de longues années, malgré de nombreuses controverses dont vous trouverez l'exposé dans les ouvrages techniques, et en particulier, dans l'excellent traité de M. Jumeau sur les accumulateurs électriques, et dans la traduction Liagre de l'ouvrage de Fr. Dolezalek « Sur la théorie de l'accumulateur au plomb ».

» A la suite de recherches très méthodiquement conduites, M. Ch. Féry a proposé une théorie différente qui est la suivante :

» A la charge, formation à la positive d'un superoxyde de plomb $Pb^2O^{\cdot}$ et de plomb réduit à la négative ;

» A la décharge, réduction du superoxyde en peroxyde PbO^2 à la positive et transformation du plomb réduit en sulfate plombeux $SO^4 Pb^2$ à la négative.

» Cette théorie paraît plus conforme aux observations expérimentales, elle évite l'intervention du sulfate $SO^4 Pb$, corps presque isolant, qu'il est pratiquement impossible d'électrolyser, elle rapproche le fonctionnement de l'accumulateur de celui des piles puisque la positive ne joue plus qu'un rôle de dépolarisant.



» Vous trouverez cette théorie développée dans le bulletin n° 77 de février 1919 de notre Société.

» La théorie de M. Féry donne comme poids théoriques des matières engagées par ampère-heure :

Pb ² O ⁵	7,86 g
Plomb réduit	7,72 g
Acide sulfurique	1,86 g
Soit au total	17,5 g

cela correspond à 57 ampère-heure par kilogramme.

» L'utilisation incomplète des matières actives, le poids des supports des bacs et divers accessoires réduisent cette capacité à des valeurs pratiques beaucoup moindres.

» **LES ÉLECTRODES.** — Elles se rapportent toutes à deux types distincts : le type Planté et le type Faure Sellon.

» Dans le premier, les électrodes sont des lames de plomb pur dont la surface est peroxydée à la positive et recouverte de plomb spongieux à la négative.

» Les plaques du type Faure sont constituées par des supports en plomb généralement antimonieux, dont les alvéoles sont garnies de matière active.

» Les variantes de chacun des types sont innombrables, mais la tendance vers un nombre plus restreint augmente très nettement.

» Dans les débuts, les constructeurs s'attachaient à réaliser des éléments pour toutes les applications avec un même genre d'électrode. Il n'en est plus ainsi, et pour un même usage, ils ont une tendance de plus en plus marquée à adopter des types de plaques différant encore comme dimensions mais se rapprochant de plus en plus comme caractères généraux.

» La plupart des constructeurs européens utilisent pour les éléments stationnaires des positives du type Planté et des négatives à oxydes rapportés.

» Pour les éléments transportables, la tendance est la même dans toutes les applications qui ont pris un grand développement industriel (électromobiles, démarrage des moteurs d'automobiles), pour ces applications, les électrodes sont du type Faure.

» **ÉLÉMENTS STATIONNAIRES.** — Les positives du type Planté sont, en général, constituées par des lames en plomb pur pré-

sentant des sillons profonds dont le but est d'augmenter la surface active. Ces plaques sont obtenues par coulée, par étirage ou par un travail mécanique des lames de plomb.

» La positive Planté à grande surface a été employée par H. Tudor dès 1895.

» Nous donnons la préférence au plomb fondu qui peut être obtenu très homogène et sans soufflures, grâce aux procédés modernes de moulage et de fonderie. Nous estimons qu'il faut éviter le plus possible tout travail mécanique des lames de plomb, ce travail se traduisant toujours par des allongements permanents ou des strictions qui compromettent la résistance mécanique du métal.

» Les caractéristiques moyennes des positives stationnaires sont les suivantes :

» La surface d'une positive pour 100 A-h en 5 heures est de 10 dm².

» La surface totale des sillons est de 7 à 9 fois la surface apparente, soit de 140 à 180 dm² pour les deux faces.

» La couche active superoxydée a une épaisseur de 0,3 à 0,5 mm, suivant le régime de décharge moyen que fournissent les éléments. Elle correspond à une capacité de 0,6 A-h au régime en 5 heures par décimètre carré de surface active.

» Le poids d'une telle positive varie de 7 à 9 kg.

» La durée des positives stationnaires bien construites varie entre 1 200 et 2 000 décharges complètes. Elle dépend beaucoup du constructeur, mais aussi des conditions d'exploitation.

» *Régime de décharge des éléments stationnaires.* — Tous les constructeurs fournissent les renseignements les plus complets à ce sujet.

» En moyenne, le régime de décharge en 5 heures correspond sensiblement à un débit de 1 ampère par décimètre carré de surface apparente, et le régime de décharge en 1 heure à 5 ampères par décimètre carré.

» On peut dépasser sans inconvénient cette intensité pour des décharges de courte durée.

» Un élément, qui peut fournir 100 A-h au régime de 20 A, peut être utilisé pour les régimes suivants s'il est complètement chargé :

» 60 ampères pendant 1 h (5 ampères par décimètre carré) ;
ou 80 ampères pendant 30 mn (6 ampères par décimètre carré) ;

ou 100 ampères pendant 15 mn (10 ampères par décimètre carré).

» *Isolement des électrodes.* — Jusqu'à ces dernières années, on utilisait presque exclusivement des tubes en verre. On leur substitue de plus en plus des diaphragmes. Ces diaphragmes sont, en général, pour les éléments stationnaires, des lames de bois d'un millimètre et demi environ d'épaisseur, convenablement traitées au préalable, pour éliminer les acides organiques qui donnent des sels solubles avec le plomb.

» Ces diaphragmes ont le grand avantage d'éviter les petits court-circuits locaux qui sont toujours le point de départ d'avaries plus graves. Ils facilitent beaucoup la surveillance des batteries ; ils ont l'inconvénient de baisser la tension moyenne de décharge de 1 à 2 centièmes de volt, et le rendement en rapport.

» *ÉLÉMENTS TRANSPORTABLES.* — Les électrodes sont toujours du type Faure, sauf pour quelques applications où la réduction de poids n'est pas d'une importance primordiale.

» Les éléments utilisés dans ce cas diffèrent très peu des éléments stationnaires et l'augmentation légère de la capacité spécifique provient exclusivement de la réduction de poids des accessoires.

» Pour les applications qui ont pris un grand développement commercial, pour le démarrage et l'éclairage des automobiles et pour les batteries d'électromobiles (encore peu utilisées en France, mais très répandues en Amérique), etc., la tendance des constructeurs est de réaliser des éléments de plus en plus semblables, tant comme type de plaques que comme dimensions d'encombrement.

» Les électrodes sont adaptées au service qu'elles doivent assurer.

» Les éléments de démarrage n'effectuent que des décharges de très courte durée à une intensité très élevée, ne représentant qu'une quantité d'électricité infime. Prenons un exemple :

» Pour le démarrage d'un moteur d'automobile de puissance moyenne, une batterie de 6 éléments de 50 A-h en 5 heures convient parfaitement et le démarrage dure normalement de 1 à 2 secondes ; l'intensité du courant atteint 150 A et plus, suivant l'état du moteur. En admettant 150 A en moyenne, la quantité d'électricité fournie est de $1/12$ A-h en 2 secondes. La batterie

est rechargée aussitôt. Un poids minime de matière active intervient dans cette décharge.

» Pour cette raison, on utilise des plaques minces qui ont l'avantage de présenter une plus grande surface de contact avec le liquide pour un même poids de matière active par élément.

» Les épaisseurs de plaques employées couramment varient de 3 à 4 mm pour les positives de 2,5 à 4 mm pour les négatives, la capacité spécifique ne dépassant guère 15 A-h par kilogramme de plaques.

» Les constructeurs américains ont été les premiers à entrer industriellement dans cette voie.

» En général, la batterie assure aussi l'éclairage de la voiture, mais il s'agit toujours de décharges n'atteignant qu'une fraction de la capacité et par conséquent ne faisant intervenir qu'une partie de la matière active disponible.

» Pour des batteries devant effectuer des décharges correspondant à la capacité totale, ou tout au moins à une grande partie de cette capacité (c'est le cas des batteries d'électromobiles), un poids important de matière active intervient dans la décharge. On doit prévoir sur la plaque une réserve de matière active pour compenser les chutes d'oxydes et assurer le maintien de la capacité.

» Les batteries d'électromobiles ont des électrodes positives de 4 à 6 mm d'épaisseur et des négatives de 3 à 4 mm, leur capacité spécifique varie de 12 à 15 A-h par kilogramme, ces batteries pèsent de 40 à 45 kg de poids total par kilowatt-heure en 5 heures.

» Ces deux exemples montrent comment on peut choisir le type de plaques convenant à une application déterminée.

» Le fabricant ne procède pas ainsi dans chaque cas. Il a deux ou trois genres d'électrodes et pour chaque genre des dimensions différentes en vue d'établir des éléments en rapport avec l'encombrement dont il dispose.

» *Isolement des électrodes.* — On emploie des séparateurs en ébonite plans ou ondulés perforés, en bois, présentant des renforts pour assurer l'écartement, quelquefois les deux séparateurs à la fois.

» On a imaginé des séparateurs en caoutchouc durci percés d'une infinité de trous garnis de fibre textile formant mèche pour la circulation du liquide (Villard).

» Pour les gros éléments, on a utilisé des lames de tissu d'amiant. Cet excellent séparateur a l'inconvénient d'introduire du

fer dans l'électrolyte, on sait que le fer provoque l'auto-décharge à circuit ouvert.

» Un séparateur idéal devrait être infiniment perméable au liquide, ne pas être attaqué par l'acide sulfurique dilué, ne pas être pénétré par les oxydes se détachant des positives, et ne pas introduire d'impuretés.

» *Matière active.* — On employait et on emploie encore les oxydes de plomb pur du commerce. Certains constructeurs fabriquent eux-mêmes leurs oxydes en s'attachant à obtenir des produits très homogènes et ayant des qualités physiques et chimiques toujours les mêmes.

» La préparation des masses actives est d'une importance capitale et nécessite des soins minutieux, l'objectif à atteindre étant l'obtention d'une matière de composition, de densité et de maniabilité uniforme. Nous estimons que c'est dans cette partie de la fabrication des accumulateurs que les progrès les plus importants ont été réalisés. C'est par là que s'établissent les différences principales qui existent entre les différents types d'accumulateurs.

» En tant que capacité spécifique, ceux qui connaissent l'histoire des accumulateurs savent parfaitement qu'il a été construit des éléments à grande capacité spécifique dès les premières applications.

» Nous citerons comme exemple remarquable les batteries établies vers 1885 par les accumulateurs Faure, Sellon, Volekmar pour des essais de traction, un peu plus tard les batteries légères de Laurent Cely, et vers 1895 les batteries de Fulmen qui permirent de faire avec une voiture électrique des parcours dépassant 150 km avec une seule charge et d'atteindre des vitesses que les premières voitures avec moteur à essence n'avaient pas dépassées. Ce n'était que des essais qui ne purent être suivis, les batteries se détériorant trop rapidement.

» L'expérience a permis de réaliser des progrès importants, et à l'heure actuelle les batteries d'électromobiles bien construites, suivant les caractéristiques moyennes que nous vous avons indiquées plus haut, peuvent assurer un service total de 500 à 600 décharges complètes avant le changement des positives.

» Les conditions d'exploitation ont une influence réelle sur la durée.

» **EX RÉSUMÉ.** — Pour les applications transportables ayant pris un grand développement commercial, les constructeurs emploient

en général des électrodes d'un type très voisin ; ils s'appliquent à obtenir une fabrication uniforme comme montage, ils apportent des soins particuliers à l'isolement durable des électrodes, et l'objectif poursuivi, de plus en plus atteint, est de fournir des batteries transportables dont les éléments fonctionnent normalement jusqu'à usure complète des électrodes. Les opérations d'entretien se résument :

- » Au maintien du niveau du liquide et de sa densité ;
 - » A des nettoyages pouvant être effectués soit par siphonnage, soit en enlevant les blocs de plaques sans les démonter ;
 - » A des charges complémentaires à intensité réglée ;
 - » Au remplacement des blocs de plaques usés.
- » RENDEMENT. — Le rendement en énergie varie suivant le régime de décharge de 0,70 à 0,75.
- » En exploitation, pour tenir compte des charges complémentaires et des surcharges, ce rendement s'abaisse vers 0,60.
- » On a le tort, d'une manière générale, de considérer la surcharge comme le remède obligatoire, et les éléments actuels bien construits, très améliorés comme isolement des électrodes, ne nécessitent que des surcharges réduites si leur surveillance est bien organisée et si l'on évite les impuretés.
- » Au repos, les électrodes se déchargent lentement (surtout les négatives), mais le repos est un état anormal et les surcharges qu'il nécessite n'ont pas une importance capitale en exploitation.

ACCUMULATEUR NICKEL-FER

» Cet accumulateur a été mis au point industriellement par Jungner et Th. Edison.

» La matière active à charge complète est constituée par du sesquioxyde de nickel Ni_2O_3 à la positive et du fer réduit à la négative (Mikalowski).

» A la décharge, Ni_2O_3 se transforme en 2NiO et le fer en FeO .

» A la charge, le phénomène inverse se produit.

» L'électrolyte est une solution alcaline de potasse ou de soude chimiquement pure additionnée quelquefois de lithine. La soude a l'inconvénient d'avoir une trop grande résistance spécifique. Le liquide n'intervient pas dans le fonctionnement de l'accumulateur, qui se résume en un transport d'oxygène de la positive à la négative à la décharge et inversement à la charge.

» En réalité, les réactions sont plus complexes, le nickel est susceptible de plusieurs degrés d'oxydation. Edison estimait que la matière positive chargée était NiO^2 ; Rosset a signalé, que toute la matière active étant transformée en NiO , la décharge pouvait continuer jusqu'à réduction complète en Ni . Cela implique, d'une part, une quantité de fer réduit en excédent à la négative et, d'autre part, l'utilisation d'une tension inférieure à 0,7 v. Cette décharge résiduelle est d'un intérêt médiocre, parce qu'elle correspond à une trop grande baisse de la tension d'utilisation.

» La force électromotrice d'un accumulateur au nickel est de 1,5 v.

» A la charge, la tension s'élève rapidement et se maintient en moyenne à 1,8 v, la tension extrême varie de 1,85 v à 1,95 v, suivant l'intensité du courant. La caractéristique de cette charge est un bouillonnement uniforme dû à l'électrolyse de l'eau contenue dans l'électrolyte, électrolyse qui se produit dès que la tension de charge s'approche de 1,8 v. Il y a là une cause importante de perte d'énergie.

» A la décharge, la tension s'abaisse de 1,5 v à 1 v pour la décharge en 5 heures. Nous avons essayé à diverses reprises, depuis 1903, des batteries au nickel, et la tension moyenne en décharge ne dépasse pas 1,15 v à 1,20 v au régime en 5 heures, pour les plus récentes.

» Le rendement en énergie, rapport entre une charge et une décharge consécutive, est au maximum de 0,45 pour la décharge en 5 heures.

» Ce rendement baisse sensiblement avec le régime de décharge, et surtout si les décharges sont poussées à fond. En exploitation, il ne dépasse pas 0,35, les surcharges étant recommandées en règle absolue pour le maintien de la capacité. Tous les essais que nous avons pu faire montrent que les variations de tension d'un élément au nickel, quand le régime de décharge varie, sont beaucoup plus considérables que celles de l'accumulateur au plomb.

» La perte par effet Joule se manifeste par un échauffement très appréciable, bien que les récipients métalliques nickelés facilitent le refroidissement.

» Cette perte nous paraît limiter la possibilité de construire des éléments de grande capacité.

» Les premiers éléments que nous avons pu examiner avaient

une variation de tension plus grande pendant la décharge, cela tenait à l'insuffisance de capacité d'une des électrodes. Nous avons constaté, en outre, d'assez gros écarts entre les divers éléments d'une batterie.

» Par la suite, l'électrode insuffisante a été doublée, puis finalement fabriquée suivant des rapports différents de poids de matière active.

» La construction actuelle est beaucoup plus homogène ; elle accuse un gain assez sensible comme rendement. Nous avons tout lieu de croire qu'un avenir plus ou moins éloigné modifiera le mode de construction de ces éléments.

» La qualité actuelle indiscutable de l'accumulateur au nickel réside dans sa robustesse mécanique, sa capacité spécifique est de 22 A-h par kilogramme de poids total au régime en 5 heures, cela correspond à un poids de 38 à 40 kg par kilowatt-heure.

COMPARAISON DES DEUX SYSTÈMES D'ÉLÉMENTS

» L'accumulateur au plomb est caractérisé par :

» Une tension moyenne en décharge plus élevée et très constante ;

» Un meilleur rendement ;

» Un prix d'achat beaucoup moindre.

» Par contre, il s'use plus rapidement, il nécessite une surveillance plus grande, son électrolyte est acide.

» L'accumulateur nickel-fer a une résistance mécanique beaucoup plus grande.

» Par contre, si son entretien se résume à des remplissages fréquents et à des surcharges copieuses pour assurer une recharge complète, son prix d'achat est très élevé, son électrolyte est très coûteux, sa tension en décharge est très variable surtout vers la fin.

» S'il est d'un poids plus faible (de 10 pour 100 environ) à énergie égale, il a, par contre, l'inconvénient de baisser beaucoup de tension en fin de décharge ; cela se traduit, par exemple, par une baisse sensible de vitesse dans les électromobiles, et l'avantage de la plus grande capacité disparaît.

» Dans toutes les applications où le maintien d'une tension constante n'est pas indispensable, et où le prix de batterie et la

dépense de courant ne sont pas des facteurs essentiels, et ces applications sont assez nombreuses, l'accumulateur nickel-fer a des avantages incontestables ; partout ailleurs, on ne peut conclure au choix de l'un ou l'autre des systèmes qu'après une étude approfondie.

» Au point de vue encombrement, les deux types d'accumulateurs sont équivalents (28 à 30 dm³ par kilowatt-heure au régime en 5 heures).

APPLICATIONS

» Les batteries stationnaires sont de moins en moins utilisées comme appoint dans les centrales, on leur réserve des services de secours de courte durée, les régimes de décharge rapides sont donc plus fréquemment adoptés qu'auparavant.

» Les batteries tampons très en faveur avec les centrales de tramways autonomes ne sont plus employées dans les mêmes conditions, elles sont utilisées surtout pour parer aux arrêts de trafic. Elles présentent toujours un grand intérêt lorsqu'elles sont installées au pied des feeders d'alimentation (batteries de ligne) ; elles assurent ainsi une tension moyenne plus régulière sur le fil de travail et consécutivement un secours en cas de manque de courant.

» Pour les batteries stationnaires, l'accumulateur au plomb est seul utilisé.

» Les batteries portables ont pris un développement commercial très important pour :

- » Le démarrage et l'éclairage des automobiles ;
- » L'éclairage des trains ;
- » Les tracteurs de manutention et de manœuvre ;
- » Les voitures électromobiles.

» Les deux premières applications se sont développées dans les divers pays en fonction des industries qu'elles intéressent.

» La guerre nous a montré des chariots de manutention rendant d'énormes services dans les usines en apportant une plus grande rapidité et une économie très marquée dans le travail. Les batteries employées pour ces petits tracteurs doivent être avant tout robustes, leur prix et la dépense de courant important peu eu égard aux services rendus et nous donnerions nettement dans

ce cas la préférence à l'élément fer-nickel pour cette application.

» Nous voulons vous parler plus particulièrement des batteries d'électromobiles. L'emploi des voitures électriques a pris une grande extension en Amérique dans un pays où le prix des voitures à essence et de l'essence sont minimum.

» *Batteries d'accumulateurs pour électromobiles.* — Il peut paraître paradoxal de vouloir utiliser une voiture électrique dont le réservoir d'énergie a des fuites et pèse environ 70 fois plus que le réservoir d'essence pour la même énergie disponible. En moyenne, un moteur à explosion fournit le kilowatt-heure sur l'arbre avec 600 g d'essence, c'est un poids environ 70 fois moindre que celui de la batterie d'accumulateurs électriques équivalente. En réalité, la différence est plus faible, le moteur fonctionnant en général à charge réduite.

» Par contre, le kilowatt-heure obtenu avec l'essence revient actuellement au minimum à 1,50 fr ; pratiquement, à beaucoup plus, à cause du mauvais rendement des moteurs à charge réduite. Le kilowatt-heure obtenu avec une batterie d'accumulateurs a un prix de revient infiniment moindre, il correspond très souvent à l'utilisation des disponibilités de nuit, dont l'emploi est un souci de plus en plus marqué des producteurs d'énergie.

Une voiture électrique comporte, à part la batterie d'accumulateurs, des organes très simples de conduite et de transmission ; elle est plus économique comme construction et comme entretien.

» Le moteur électrique est infiniment supérieur au moteur à essence, tant comme rendement à toutes les charges que comme coût d'entretien.

» Le poids des accumulateurs ne permet pas d'envisager les grands parcours. Malgré cette condition, les applications possibles sont nombreuses et nous pouvons citer les voitures de place publiques et particulières, les voitures faisant les services urbains, les voitures d'hôtel, de livraison, certains services publics et les services de gare des usines.

» Ces services sont caractérisés par des démarrages fréquents et une vitesse commerciale réduite. Il est reconnu que pour les parcours de ville, la voiture à essence a une dépense de combustible et un entretien plus élevé que sur la route.

» Aux Etats-Unis, il circule à l'heure actuelle des milliers de voitures électriques de tous les genres.

» Les producteurs de courant, tout aussi bien que les constructeurs de voitures ou d'accumulateurs, se sont ingénies pour supprimer à leur clientèle tous les inconvénients de l'exploitation (surveillance des charges et entretien des batteries d'accumulateurs). Des organisations se sont créées qui laissent seulement à la clientèle les frais d'achat de la voiture et lui assurent la libre disposition permanente d'une batterie d'accumulateurs moyennant le paiement du courant et une redevance kilométrique d'entretien. Cette redevance comporte même, dans certains cas, l'entretien proprement dit de la voiture, les bandages seuls sont facturés à part.

» *Batteries d'accumulateurs nickel-fer ou batteries d'accumulateurs au plomb.* — Les avantages de l'un des éléments par rapport à l'autre ne sont pas suffisamment marqués pour qu'une décision intervienne pour l'un à l'exclusivité de l'autre. Leur choix est lié aux conditions particulières de l'exploitation envisagée (prix du courant, capital engagé, commodité des recharges, etc.). Chaque cas exige une étude préalable et nous en avons une preuve dans ce qui se passe aux Etats-Unis, où l'emploi des batteries au plomb est sensiblement plus important que celui des batteries nickel-fer.

» *Parcours possibles.* — Une batterie d'accumulateurs est un réservoir à capacité variable suivant l'intensité du courant de décharge. Or, ce courant varie avec la vitesse du véhicule, la nature du sol, les déclivités et la fréquence des démarrages, la longueur du parcours possible est donc très variable.

» Les maisons américaines indiquent des parcours de 35 à 45 miles pour une seule charge, pour des véhicules transportant un poids utile de 3 à 5 tonnes, à des vitesses de 10 à 12 miles à l'heure. Ces chiffres correspondent à des coefficients de roulement faibles et pratiquement nous estimons que les parcours possibles varieront de 10 à 50 km, suivant la nature de la route et que les vitesses n'excéderont pas 12 à 15 km:h.

» Pour les voitures à voyageurs 2 ou 4 places, la vitesse pourra atteindre 25 à 30 km:h en palier, et le chemin parcouru 60 à 70 km sans recharge. Le parcours journalier peut être plus grand si

on dispose de postes de charge pour récupérer partiellement l'énergie dépensée.

» Des essais infructueux ont été faits en France à différentes époques, mais nous ne pouvons pas conclure négativement pour cela, parce que les objectifs envisagés étaient irréalisables et les voitures elles-mêmes étaient très inférieures à celles qui peuvent être construites maintenant, grâce à l'expérience acquise en matière d'automobile. En outre, la connaissance plus profonde des possibilités en matière d'accumulateurs permet de placer les batteries dans les meilleures conditions d'exploitation et d'entretien.

» Quand on étudie une automobile à essence, la position du réservoir est un problème très secondaire. Il n'en est pas de même pour une électromobile : l'installation de la batterie d'accumulateurs sur le châssis est d'importance primordiale, il en est de même des conditions dans lesquelles elle sera connectée avec le moteur et des dispositifs employés pour son entretien.

» Nous avons surtout insisté pour cette application, parce qu'elle correspond aussi à une nécessité du moment. Notre pays dispose d'énergie électrique et il est du plus haut intérêt de l'utiliser au mieux. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Nissou.

M. BRYLINSKI rappelle qu'il y a une vingtaine d'années, M. Lalancé, qui était à la tête de toutes les innovations, a fait circuler sur la Seine des bateaux mus électriquement, et que si cet essai n'a pas eu de suite, ce n'est que pour des raisons entièrement étrangères à la technique.

L'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL DES STUDIOS

M. Pierre Bossu. — « Chargé par la 2^e Section de notre Société de vous présenter les résultats des travaux qu'elle a entrepris sur : L'Eclairage artificiel des studios de prise de films cinématographiques, je m'excuse d'abord de n'avoir pu réduire davantage le développement des sujets que cette étude comporte.

» J'ai tâché de limiter celle-ci dans le cadre du sommaire suivant :

- » 1^o Exposé de la question de l'éclairage des studios ;
- » 2^o Examen des appareils d'éclairage utilisés dans les studios ;
- » 3^o Rôle de l'ingénieur éclairagiste ;
- » 4^o Etude scientifique de la question ;
- » 5^o Solutions préconisées pour remédier aux inconvénients révélés par l'expérience.

I. — EXPOSÉ DE LA QUESTION DE L'ÉCLAIRAGE DES STUDIOS.

» Dans les studios de prise de films, on utilise des sources lumineuses de plus en plus puissantes, au fur et à mesure des perfectionnements de la mise en scène ; et comme le personnel qui manie ces sources lumineuses n'en connaît généralement ni la technique, ni les dangers, certaines précautions particulières sont couramment omises.

» Il en est résulté des malaises causés aux artistes évoluant dans de tels champs lumineux.

» Les Syndicats d'artistes se sont alarmés, et une campagne s'est engagée à ce sujet. Des articles furent écrits dans la presse parisienne et dans certaines publications techniques. La 2^e Section a pensé qu'il était nécessaire d'étudier cette question au double point de vue scientifique et pratique, afin de donner d'utiles conseils aux usagers de ces sources lumineuses, et de rechercher la possibilité de réduire les inconvénients signalés.

» Nous ne parlerons pas de la gêne apportée dans le travail des artistes par les contrastes lumineux. Le metteur en scène et les artistes eux-mêmes y remédient. Nous n'envisagerons que les accidents possibles.

» Ceux-ci sont de deux sortes :

- » a, les coups de soleil, ou irritation de la peau ;
- » b, les accidents causés à l'organe de la vision.

» Les coups de soleil peuvent être assez facilement évités par l'usage des fards avec lesquels se griment les artistes.

» Il n'en est pas de même pour les yeux, car dans le travail du studio, l'œil, s'il n'intervient pas comme organe de vision, ne peut cependant pas être artificiellement protégé.

» Quelques observateurs ont cru pouvoir attribuer à l'excitation lumineuse sur les yeux, des vertiges, voire des nausées. (Les mêmes effets seraient produits par la simple pression effectuée sur le globe de l'œil).

» Comme moyen de défense (en outre de la clôture des paupières et de la contraction pupillaire), l'œil possède les glandes lacrymales qui jouent un rôle lors de l'irritation mécanique de la conjonctive ; mais les ophtalmologistes ne croient pas qu'elles protègent l'œil contre l'irritation chimique des rayons de courte longueur d'onde.

» Au sujet des accidents du travail provoqués par l'éclat violent, ou les rayons de courte longueur d'onde, les docteurs spécialistes estiment qu'ils sont immédiats et ordinairement passagers.

» D'après cet exposé, on remarquera que la question de « l'éclairage des studios pour prise de films cinématographiques » est un des problèmes les plus importants à résoudre dans l'industrie cinématographique, où il est indispensable que l'outillage satisfasse aux conditions très particulières de la technique du film.

» La situation de cette industrie peut, en effet, paraître paradoxale, car « l'éclairage » des studios ne cherche pas à réaliser les conditions d'éclairement donnant le maximum de visibilité à l'œil humain, mais à impressionner la plaque photographique, dont la sensibilité maximum, très décalée vers le violet, est entièrement différente de celle de l'œil normal. On sait que la sensibilité maximum de celui-ci correspond à une longueur de $0,55 \mu$, alors que la plaque photographique ordinaire présente son maximum de sensibilité pour les longueurs d'onde de $0,42 \mu$.

» Dans les prises de films, il s'agit donc de plonger les artistes dans un champ « actinique » capable d'impressionner le film ; le degré de visibilité de l'œil était, industriellement, négligeable.

II. — EXAMEN DES APPAREILS D'ÉCLAIRAGE UTILISÉS DANS LES STUDIOS

» Ces appareils sont de quatre sortes :

- » *a*, les lampes à arc,
- » *b*, les lampes à vapeur de mercure,
- » *c*, les projecteurs à arc,
- » *d*, les lampes à incandescence.

» Nous examinerons successivement chacun de ces quatre procédés d'éclairage.

» *a. Lampes à arc.* — Les lampes à arc sont généralement du type à vase clos, ou à feu nu, consommant de 20 à 25 ampères. On utilise également les lampes à flamme.

» Ces lampes sont montées en batteries et disposées de chaque côté des acteurs, souvent assez près de ceux-ci. Dans certaines scènes, l'éclairage par plafonniers est nécessaire. Ces plafonniers sont constitués par des lampes à arc groupées.

» Les lampes à arc utilisées ont une grande puissance, et comme la surface éclairante est très réduite, l'éclat est considérable. L'emploi, dans ces lampes, de charbons dits « actiniques » favorise la production de rayons de courte longueur d'onde.

» *b. Lampes à vapeur de mercure.* — Les lampes à vapeur de mercure sont généralement placées derrière les portants, afin d'éviter les ombres. Certains studios ont utilisé les lampes à vapeur de mercure pour l'éclairage général de la scène. Ces lampes sont alors montées par batterie de six ou dix, sur un support. Un réflecteur émaillé est placé de façon à renvoyer la lumière dans la direction des artistes. On a aussi utilisé ces lampes pour la constitution de plafonniers.

» L'emploi des lampes en quartz *nues* doit être formellement interdit. Elles doivent toujours être munies d'un globe en verre qui est fourni avec elles.

» *c. Projecteurs à arc.* — Les projecteurs sont utilisés, en général, comme « soleils artificiels », ou, pour l'éclairage d'une scène qui ne permet pas d'approcher suffisamment les lampes à arc.

» Les rayons émis par les charbons, ou la flamme, sont réfléchis en un faisceau parallèle par des miroirs courbes, et dirigés sur la scène à éclairer.

» Les cratères de certains arcs ayant un très grand éclat sont

nuisibles pour l'œil lorsque leur image se forme sur la rétine où elle produit un scotome.

» *d. Lampes à incandescence.* — Certains studios, en Amérique, sont éclairés par des lampes à incandescence à milieu gazeux, dites « demi-watt ». Ces lampes ont une intensité lumineuse de 60 000 bougies. Elles comportent quatre filaments spiralés, branchés en parallèle, constitués par un fil de tungstène de 2,5 mm de diamètre. La partie sphérique de l'ampoule a un diamètre de 30 cm environ.

III. — ROLE DE L'INGÉNIEUR ÉCLAIRAGISTE

» En général, on peut dire que l'éclairage des studios se fait, non seulement au point de vue de la valeur actinique du champ, mais aussi, au point de vue artistique de l'éclairage général.

» Un bon metteur en scène sait ce qu'il veut obtenir et « juge » de l'effet, avant de tourner le film. Bien souvent, les metteurs en scène sont dépourvus de connaissances techniques, et ne soupçonnent pas toutes les ressources qu'ils pourraient tirer d'un éclairage étudié. C'est ici qu'intervient le double rôle de l'ingénieur éclairagiste, quant à l'étude de la question, et à la proposition de remèdes aux inconvénients reconnus.

IV. — ETUDE SCIENTIFIQUE DE LA QUESTION

» Cette étude nous conduit à envisager la valeur de la lumière :

» 1° Au point de vue photographique ;

» 2° Au point de vue des dangers physiologiques.

» 1° *Effets photographiques.* — Une première qualité de la lumière utilisée dans les studios est d'être « activante » pour les plaques ou films utilisés.

» Comme nous l'avons fait remarquer plus haut, la sensibilité maximum de la plaque photographique ne correspond nullement au maximum de sensibilité de l'œil humain moyen.

» Aux débuts de la photographie, cette non-coïncidence du maximum de sensibilité de la plaque employée et de la rétine, obligeait l'opérateur à des modifications de mise au point pour amener la plaque dans le plan d'intersection des radiations pour lesquelles elle présentait son maximum de sensibilité. C'est cette

différence de sensibilité qui oblige à rechercher, non pas des rayons qui « éclairent », mais des rayons qui « activent » (ou impressionnent) la plaque au maximum.

» Les efforts constants des photographes et des chimistes, cherchant à corriger ce défaut, ont abouti aux plaques panchromatiques, dont la courbe de sensibilité se rapproche de celle de l'œil humain ; ou plutôt, dont la sensibilité a été très étendue dans la partie infra-bleue du spectre.

» Une seconde qualité importante de la lumière éclairant un studio est la fixité. Pour obtenir des mouvements continus sur l'écran, il est indispensable que les mouvements des acteurs soient décomposés en un aussi grand nombre d'éléments que possible, ce qui nécessite la prise d'un grand nombre d'épreuves par seconde.

» Généralement, on prend de 12 à 20 clichés par seconde ; cela exige une grande sensibilité photographique du film.

» Comme il y a une limite à cette sensibilité, on est obligé d'éclairer la scène et les acteurs très violemment, afin d'obtenir le maximum de rapidité.

» 2° *Effets physiologiques.* — Quels sont les effets de la lumière sur les organismes vivants, plus particulièrement l'épiderme et l'œil ?

» Les rayons les plus réfrangibles sont les plus nocifs. Telle est la conclusion de nombreux travaux et expériences.

» Pour l'œil, on a constaté d'après des expériences faites sur des animaux soumis à l'action de l'arc électrique, que le nerf optique pouvait présenter des lésions ou des désordres graves, après une exposition assez longue à la lumière d'un arc nu.

» On a constaté que les effets nocifs de la lumière de l'arc sont abolis par l'interposition d'un verre rouge, et non par celle d'un verre bleu.

» L'action sur l'épiderme d'un puissant rayon lumineux est presque complètement supprimée par l'intervention d'un verre, surtout d'un verre coloré.

» Dans un autre ordre, l'effet direct sur l'œil d'une source à éclat violent, produit un scotome sur la macula.

» On ne connaît pas la limite de nocivité du scotome par durée d'expérience. Le docteur Broca ayant, à l'âge de 29 ans, fixé volontairement le soleil pendant deux secondes, a gardé sur la rétine une image accidentelle sur fond clair qui dura 48 heures,

mais disparut totalement, sans laisser de trace, ni d'affaiblissement de l'acuité visuelle. On peut donc en inférer que ces sortes d'accidents ne comportent pas habituellement de suites durables, du moins chez les sujets jeunes, quoique un journal scientifique ait inséré dans ses colonnes « que l'on citait même quelques cas de cécité » dus à l'éclat de phares éblouissants. Nous devons ajouter qu'il nous a été impossible de nous faire confirmer l'exactitude de cette citation.

» Un facteur important à considérer dans ces cas pathologiques, c'est le temps d'exposition.

» Un éclair instantané ne produit qu'un scotome peu durable sans autre suite. Une simple lumière vive frappant l'œil pendant longtemps peut produire une conjonctivite.

» Nous verrons par la suite qu'on peut utiliser cette remarque dans les solutions que nous préconisons.

V. SOLUTIONS PRÉCONISÉES

» *Solutions immédiates.* — Les studios sont disposés de façon à permettre de tourner les films par n'importe quel temps. Il est rare que seule, la lumière du jour y soit employée.

» D'autre part, à cause de la partie artistique qui joue un rôle très important dans l'industrie du film, il est nécessaire que les metteurs en scène puissent disposer à leur gré de l'orientation, ainsi que de la variété de la lumière ; ce qui serait presque impossible avec la seule lumière du soleil. Une lumière artificielle puissante est donc indispensable à cette industrie.

» Actuellement, on tend à construire des studios obscurs, comportant une aération parfaite, et seulement de très petites fenêtres ne permettant pas à la lumière du jour d'entrer à flot, mais au contraire, laissant pendant le jour, filtrer un peu de lumière, afin d'obtenir un clair-obscur suffisant à l'évolution des machinistes ou agents. Dans ces conditions, on est maître de la lumière, et l'éclairage fixé par le metteur en scène peut être maintenu invariable pendant toute la durée de la prise du film, et même reproduit à volonté, à et par n'importe quel temps.

» Cette invariabilité de l'éclairage est impossible à obtenir dans un studio clair, où le soleil est, non seulement gênant, mais où les différences d'éclairement d'un jour à l'autre, voire même

par un ciel nuageux, d'un instant à l'autre, font varier « l'ambiance » dans de telles proportions qu'on est souvent obligé de recommencer le film.

» On n'est jamais certain de l'équivalence de l'ambiance d'un jour à l'autre, ou d'un mois à l'autre. Or cette constance s'impose, car dans l'industrie cinématographique, deux épisodes consécutifs sur l'écran sont parfois « tournés » à plusieurs mois de distance.

» De plus, un studio clair constitue une véritable serre. En été, la chaleur y est excessive. En hiver, le chauffage y est onéreux, à cause de la déperdition considérable de chaleur.

» Ces deux inconvénients sont encore évités par les murs épais des studios obscurs.

» Ce sont toutes ces raisons qui les font préférer aux studios clairs.

» Nous allons maintenant examiner les différentes solutions qui permettent d'éviter les accidents cités plus haut.

» Nous avons vu qu'un facteur important dans le résultat de l'effet nocif d'un rayon était le « temps d'exposition ». Il convient donc de réduire celui-ci au minimum.

» La prise de film comporte plusieurs phases :

- » 1° Construction ou installation du décor ou lieu de scène ;
- » 2° Installation de l'éclairage du décor ou de la scène ;
- » 3° Etude du jeu des artistes (mise en scène) ;
- » 4° Répétition de la scène à filmer ;
- » 5° Prise d'un fragment de film d'essai ;
- » 6° Prise du film.

» La question de nocivité des lumières utilisées n'intervient que dans les quatre dernières phases et l'éclairage total n'est nécessaire que dans les deux dernières phases.

» Les durées respectives de ces quatre phases sont très variables. On peut assurer néanmoins que la dernière est forcément très courte, à cause de la longueur limitée des bobines de film. En effet, une bobine de film a, au maximum, 100 mètres de longueur. Chaque mètre comporte 52 clichés. La vitesse de prise est de 12 à 20 clichés par seconde, ce qui donnerait cinq minutes de durée maximum de prise de film.

» Il est excessivement rare de tourner en entier une bobine

de film de 100 m sans arrêt. Généralement, la prise de film est très courte. La mise en scène et la répétition sont assez longues, car on fait recommencer plusieurs fois la scène, pour perfectionner le jeu des artistes. Le metteur en scène allume généralement toutes les lumières, afin de juger des effets produits. Lorsque la répétition est terminée, la scène est immédiatement tournée. L'opération est, en moyenne, recommencée trois fois, afin d'avoir trois séries de clichés, parmi lesquels on prendra les meilleurs.

» Aux Etats-Unis, on ne recommence jamais une scène, mais un grand nombre d'opérateurs la filment simultanément, et parmi les films obtenus on choisit les mieux réussis, et comme « impression » et comme « position » ou « point de vue ».

» Il est certain que si l'intensité lumineuse totale n'était donnée que pendant la prise du film, les effets nocifs produits sur les acteurs auraient les conséquences les plus bénignes.

» Dans beaucoup de studios, les directeurs se sont efforcés d'atténuer ou de supprimer les effets dus aux rayons des lampes à arc, du moins pendant la répétition de la scène, en se servant d'écrans de toile, ou de verres dépolis.

» Pour les projecteurs, ces précautions sont inopérantes, à cause de la trop forte diffusion des écrans qui arrêtent net le faisceau lumineux du projecteur, et l'empêchent d'atteindre son but. Des verres de couleur, ou des verres fumés seraient seuls capables de laisser le faisceau lumineux atteindre le but.

» Bien souvent, les verres ainsi interposés se brisent sous l'effet de la concentration des rayons calorifiques émis par les lampes.

» On peut donc préconiser :

» Ou l'allumage des projecteurs à la dernière minute pendant un temps très court, ce qui se fait généralement ;

» Ou, dans la solution que nous exposerons ci-après, l'utilisation de verres jaunes spéciaux placés en dehors des foyers calorifiques.

» Certains directeurs d'établissements cinématographiques font payer le courant aux metteurs en scène, afin d'éviter un excès de lumière inutile et dangereux, pendant la période de préparation, toujours assez longue. On pourrait utilement généraliser cette mesure.

» Ici, même remarque curieuse s'impose. Elle apprendra aux

personnes non averties de la technique du film, que la « durée d'exposition » des artistes aux lumières intensives, peut être réduite dans des proportions inimaginables.

» Les artistes interprétant une scène à filmer travaillent en moyenne 8 à 10 heures par jour. Presque tout ce temps est utilisé en longues et minutieuses préparations. Mais le travail effectif c'est-à-dire le « jeu » de la scène ne dure environ qu'une quinzaine de minutes, y compris l'impression du fragment de film qu'on développe instantanément, pour se rendre compte de l'effet produit par la disposition des lampes. Quant au « jeu » qui sera filmé, et seul connu du public, sa durée est d'environ une minute.

» Un film qui dure une heure sur l'écran demande 7 à 8 semaines de « tournage », ce qui représente une minute ou une minute et demie par jour de « jeu » filmé.

» Certains metteurs en scène prétendent qu'il est impossible de régler une scène dans son effet artistique, si on ne la voit pas « à plein feu ». Il nous paraît qu'un metteur en scène averti, et connaissant à fond son art, doit pouvoir « extrapoler » un effet, et dans ces conditions faire la répétition à feux masqués ou réduits, et n'allumer en plein, qu'à la dernière minute.

» Dans tous les cas, on devra recommander l'emploi d'écrans en verres spéciaux interceptant les rayons ultra-violets considérés comme étant les seuls nocifs. On peut remarquer à ce sujet que malgré leur opacité relative, ces écrans en verre clair ne diminuent que d'assez peu l'effet photogénique du faisceau lumineux. Les rayons ultra-violets sont inutiles dans le champ d'évolution des artistes puisqu'ils n'atteignent jamais le film, les lentilles des objectifs employés étant en verre.

» Pour atténuer l'éclat des sources, on doit recommander l'utilisation d'écrans, ou globes diffuseurs, afin d'obtenir des sources lumineuses, non pas ponctuelles, mais d'un volume assez considérable et d'un éclat moindre. Dans tous les cas, ces écrans font perdre une certaine partie de la lumière, mais on peut alors augmenter un peu le nombre des sources pour compenser cette perte. On remarquera, comme nous l'avons déjà dit, que ces écrans, ou globes diffuseurs, ne peuvent s'employer qu'avec les lampes à arc ou à incandescenc.

» Pour les projecteurs, il est nécessaire d'avoir un réglage parfait du réflecteur, afin qu'il utilise le plus complètement pos-

sible la lumière émise, soit par le cratère de l'arc, soit par la flamme. Il est indispensable, en outre, de disposer les projecteurs d'une façon telle, que leur faisceau ne frappe pas directement les yeux des artistes. A ce sujet, il est à remarquer que dans le cas d'un éclairage intensif, l'image rétinienne formée, même sur la partie périphérique de la macula, n'est pas négligeable, parce qu'elle a une influence sur les réflexes, et qu'il y a, inconsciemment, lutte nécessaire pour l'accommodation, d'où résulte une fatigue.

» Les lampes à vapeur de mercure n'ayant pas un éclat considérable, il ne semble pas nécessaire d'utiliser avec elles, des écrans protecteurs.

» Toutes les solutions que nous venons d'indiquer sont des solutions immédiates de la question. Elles peuvent s'appliquer, sans grande modification du matériel existant. Elles devraient être obligatoires dans tous les studios de prise de films.

» Nous citerons à titre d'indication qu'il existe certains studios exclusivement éclairés par des lampes à vapeur de mercure. Relativement à l'emploi de ces lampes, un docteur spécialiste allemand donne les conclusions suivantes :

« Les lampes modernes à vapeur de mercure éclairent sur
« toute leur longueur, en émettant une lumière bleu-verdâtre,
« parfaitement stable, sans soubresauts, sans dégagement de
« chaleur. On peut donc les regarder de près, et pendant très
« longtemps, sans être aucunement ébloui, sans aucun larmoie-
« ment, et sans aucune inflammation de la conjonctive. Comme
« nous l'avons déjà dit, les rayons exerçant un pouvoir destruc-
« tif sur les tissus animaux sont totalement absorbés par le
« verre. »

» Voici donc, avec les lampes à vapeur de mercure, une autre solution immédiate du problème de l'éclairage des studios de prise de film.

» *Solution future.* — Nous allons décrire maintenant la solution future de l'éclairage des studios. Nous disons « la solution future », parce qu'elle exige encore beaucoup trop de lumière pour être adoptée pratiquement.

» Nous avons dit qu'on éviterait à coup sûr les effets nocifs de la lumière des lampes à arc, ou à incandescence, en plaçant devant celles-ci des écrans en verre jaune. Les artistes pourraient alors évoluer sans aucun danger dans le champ lumineux

ainsi obtenu. Mais dans ces conditions, il est indispensable de remplacer le film ordinaire par le *film panchromatique*.

» Le film panchromatique, en outre qu'il permet de résoudre la question de l'éclairage inoffensif, présente l'avantage de donner une vérité documentaire plus grande. Il reproduit exactement les valeurs des tons les uns par rapport aux autres, à l'encontre des films ou plaques ordinaires. Si l'on photographie sur celles-ci, une étoffe bleue saturée ornementée de jaune clair, on obtiendra les ornements foncés sur fond clair, ce qui est loin de reproduire l'effet réel, tandis que le film panchromatique reproduira le jaune et le bleu dans leur rapport photographique exact.

» De plus, le film ou la plaque panchromatique, ayant une courbe de sensibilité se rapprochant de celle de l'œil humain, on peut employer des objectifs présentant au moins le même chromatisme que l'œil. Dans ces conditions, la rectification de la « mise au point visuelle » n'est pas nécessaire. On n'obtiendra donc pas d'images floues, mais un modelé et un effet de perspective aérienne, qui doivent être recherchés plus particulièrement dans la projection cinématographique.

» Des expériences sur ce film ont été faites à l'Office national des Recherches et Inventions de Bellevue. Vous en trouverez les résultats dans les bulletins officiels des 24 février et 31 mars 1923. D'après ces expériences, il ressort que le film panchromatique en *lumière jaune* demande 25 fois plus de pose qu'un film ordinaire pour le même résultat. C'est pour cela que cette solution n'apparaît pas pratique, actuellement.

» Des essais d'hypersensibilisation de ces films ont été tentés, mais malheureusement, cette hypersensibilisation rend le film spontanément altérable et réduit à un temps insuffisant sa durée de conservation.

» Ceci n'est qu'un résumé des travaux entrepris par la 2^e Section sur l'Eclairage des Studios de prise de films. L'exposé complet de ces travaux exigerait un développement dont l'ampleur dépasserait le cadre d'une conférence déjà longue.

» Les membres de la Société, susceptibles de s'intéresser particulièrement à cette question, pourront demander au Président de la 2^e Section les renseignements complémentaires.

» Afin de traiter cette étude avec l'exactitude et la documentation nécessaires, la 2^e Section a jugé utile de consulter des spé-

cialistes, et il me reste à remplir l'agréable devoir de remercier ici, en son nom, pour l'importante collaboration qu'ils ont bien voulu nous prêter, et qui donne à cette étude la plus grande partie de son intérêt :

» Les docteurs Polack, Piéron et Comandon ;

» M. Breton, directeur de l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles ;

» Les directeurs des Etablissements Gaumont ;

» M. Mallet-Stevens, qui a bien voulu aider notre enquête de sa compétence artistique ; car ne l'oublions pas, tout progrès scientifique, dans la forme actuelle de l'esprit humain, ne doit négliger aucun aspect intellectuel, sous peine de stérilité.

*
**

» Après la conférence, des films d'expérience dus à l'obligeance de M. Breton, ont été projetés.

» Dans ces films, les costumes et la décoration ont été choisis de telle sorte que les contrastes de couleurs se révèlent différents, suivant l'étendue dans le spectre, de la sensibilité de ces films.

» Les membres présents ont pu constater que le film panchromatique reproduit les rapports exacts des valeurs entre elles.

» Le premier film projeté est un film Kodak ordinaire. Il a été « pris » en lumière blanche produite par 18 arcs à courant continu de 25 ampères.

» Objectif foyer. 3,5.

» Obturateur d'ouverture, 45°.

» Vitesse de rotation de la manivelle, 108 tours par minute.

» Développement satisfaisant en 8 minutes.

» Le jeu des acteurs est normal, mais les couleurs ne sont pas représentés dans leurs rapports exacts.

» Le second film projeté est un film panchromatisé Gaumont.

» Des verres jaunes (plans) sont placés à une distance de 24 cm des arcs. Les autres conditions sont les mêmes que dans la précédente expérience.

» Obturateur d'ouverture, 180°.

» Vitesse de rotation de la manivelle, 30 tours par minute.

» Le développement de cet essai a nécessité 20 minutes.

» Les mouvements des acteurs sont saccadés, à cause de la faible vitesse de prise, mais le rapport exact des teintes est obtenu avec netteté.

» Le troisième film est un film panchromatisé Gaumont. Les conditions d'expérience sont semblables aux précédentes. Seuls les verres jaunes, au lieu d'être placés devant les arcs, sont placés devant l'objectif. Les acteurs ne sont plus protégés, mais ces conditions permettent de préciser la cause de la lenteur d'action de la lumière obtenue sur le film panchromatique. La vitesse de la manivelle a pu atteindre 60 tours par minute.

» Les mouvements des acteurs sont un peu moins saccadés, le rapport des teintes est exact.

» Enfin, le quatrième film projeté est pris dans les mêmes conditions que le précédent avec la seule différence que l'écran en verre jaune ordinaire est remplacé par un écran jaune pour plaques autochromes Lumière.

» Le développement a été satisfaisant en 10 minutes.

» Les mouvements des acteurs sont moins saccadés et le décor est rendu avec une vérité saisissante.

DISCUSSION SUR LA COMMUNICATION DE M. BOSSU

M. le Professeur Broca rappelle que d'après les expériences qu'il a faites avec MM. Laporte, Jouaust et de la Gorce, la lampe au mercure donne des phénomènes de fatigue manifestés par les contractions pupillaires plus grandes que celles que donnent les lumières de même éclat et contenant moins de radiations très réfrangibles. Cela est peut-être dû à la fréquence de la lumière mais peut-être aussi à ce fait qu'elle est plus sensiblement monochromatique. On sait, en effet, que tout se passe comme si sur la rétine il y avait trois processus indépendants impressionnés par les diverses radiations, le maximum étant, pour le premier, dans le rouge ; pour le second, dans le vert ; pour le troisième, dans le bleu-violet. Une lumière bleue a, à égalité d'éclat une action beaucoup plus grande sur le troisième processus qu'une lumière moyenne. On comprend donc qu'il puisse y avoir une fatigue plus grande.

L'observation se fait aussi avec la lampe au néon, ce qui semble corroborer cette hypothèse.

Il est donc médiocre, au point de vue de l'hygiène, d'employer

des lumières à spectre de raies, surtout limitées aux extrémités du spectre : ceci est d'ailleurs mauvais au point de vue artistique, car cela ôte aux objets toutes les valeurs normales des teintes : à la lumière du mercure les lèvres sont noires ou à peu près. Les essais faits pour employer les films panchromatiques sont des plus intéressants en y joignant l'emploi de l'objectif de Polack dont M. Bossu a parlé. Il faut ajouter que cet objectif hyperchromatique jouit cependant de la propriété d'avoir ses points nodaux confondus, ce qui assure le centrage des cercles de diffusion chromatique au lieu qu'avec un objectif chromatique ordinaire les cercles de diffusion ne donnent pas les mêmes dégradés que l'œil humain. Quand on opère en film monochromatique on n'a plus les notions de couleur mais les passages conservent cependant les valeurs correctes, grâce à cette concentration des points nodaux.

Un membre demande s'il a été réalisé des appareils permettant la lecture directe des flux lumineux.

L'emploi des cellules de sélénium auquel il était naturel de songer, a donné beaucoup d'irrégularités. M. Bossu répond que les lumenmètres existants ne permettent que la comparaison du flux étudié avec un flux pris pour étalon.

M. LE PRÉSIDENT remercie M. Bossu et M. le professeur Broca.

INFORMATIONS

Décisions du bureau

Dans sa séance du 9 mai, le Bureau a décidé de confier à de jeunes ingénieurs récemment sortis de l'Ecole supérieure d'Electricité, le dépouillement des périodiques français et étrangers pour la mise au point des questions pouvant être étudiées par les Sections. Ce travail sera rémunéré.

L'American Institution of Electrical Engineers ayant invité la Société française des Electriciens à se faire représenter à sa réunion de Boston, le Bureau décide de prier M. Leblanc, membre résidant aux Etats-Unis, de vouloir bien se charger de cette représentation.

La représentation de la Société au Congrès de l'Electrification des Campagnes, à Montpellier, est confiée à M. Hugues, directeur de la Compagnie d'Electricité de cette ville.

Le Bureau décide de faire participer la Société française des Electriciens et l'Ecole supérieure d'Electricité, à l'Exposition de Gand qui se tiendra de juin à octobre prochains.

En vue d'élargir le recrutement de la Société, il décide d'envoyer aux membres une circulaire contenant des demandes d'admission et des invitations à faire partie de la Société, en les priant de répandre ces documents dans leur entourage.

Il charge le Délégué général d'étudier la constitution des groupements régionaux.

NOTA. — *Les membres de la Société qui seraient désireux de participer au travail de dépouillement des périodiques sont invités à envoyer leur nom au Délégué général.*

Travaux des sections

1^{re} SECTION

Dans sa séance du 2 mai, la première Section, sous la présidence de M. Roth, s'est organisée pour porter à son ordre du jour les questions les plus importantes rentrant dans sa compétence, et actuellement en discussion dans la presse technique.

Elle entendra notamment à sa prochaine réunion l'exposé d'une note de M. Belfils, sur la surcharge dans les machines électriques.

Elle a retenu pour les mettre immédiatement à son programme les 2 questions suivantes : *Construction moderne de transformateurs à grande puissance. Surtensions.*

M. Stokvis a exposé le diagramme des transformateurs dans la connexion Scott, en montrant l'intérêt que présente ce montage pour atténuer les effets du déséquilibre sur le réseau et sur les génératrices.

Cette communication sera présentée le 6 juin, à la séance de la Société française des Electriciens.

Les deux prochaines réunions de la Section se tiendront le 6 juin et le 4 juillet, à 17 heures, 14, rue de Staël.

NOTA. — *Toutes les personnes qui s'intéressent au programme de la 1^{re} Section peuvent se faire convoquer à ses séances en adressant une demande par carte postale au Délégué général de la Société, 14, rue de Staël.*

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

Le Bulletin de mai de l'Institution contient les indications ci-après, communiquées par M. Dennery, Inspecteur général des Postes et des Télégraphes en France.

« Comme suite aux suggestions faites par M. Frank Gill, nouveau Président de l'Institution, dans son discours inaugural du 2 novembre 1922, M. Paul Laffont, sous-secrétaire d'Etat des Postes et des Télégraphes a réuni le 12 mars 1923, une conférence internationale pour étudier les moyens à prendre afin de perfectionner les communications téléphoniques en Europe.

Sous la présidence de M. Dennery, cette conférence a réuni des délégués des pays suivants : France, Belgique, Grande-Bretagne, Italie, Espagne et Suisse.

Les conclusions prises seront soumises aux administrations des pays intéressés.

La conférence a souligné comme de toute première importance l'unification des principes de l'industrie téléphonique.

Elle a conclu à la nécessité de constituer une Commission qui prendra le titre officiel de Comité consultatif international des Communications téléphoniques internationales.

Pour assurer la continuité des travaux, il sera établi à Paris, un Secrétariat permanent qui concentrera toutes les informations techniques internationales.

M. Dennery et le secrétaire général du Comité, M. Valensi, rempliront provisoirement les charges de Président et de Secrétaire permanent du Comité consultatif.

La collaboration des nations créée par la Conférence préliminaire a permis d'établir un programme des nouvelles liaisons téléphoniques par fils aériens et par câbles qui devront être commencées immédiatement pour être terminées en 1924.

Enfin, le Comité va préparer un programme décennal pour l'établissement d'artères téléphoniques en Europe. »

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

PROGRAMME DES TRAVAUX. — Les questions suivantes sont en discussion devant l'Institution of Electrical Engineers :

- 1° Isolateurs et isolants ;
- 2° Fourniture de courant continu pour la téléphonie.

BIBLIOGRAPHIE

Recueils des Conférences-Rapports de Documentation sur la Physique. — Edités par la Société « Journal de Physique ». Dépositaires : les Presses universitaires de France, 49, boulevard Saint-Michel, Paris, et Librairie scientifique A. Blanchard, 3, place de la Sorbonne, Paris. Première série : tomes I à V : 5 vol. 25 cm × 16 cm, cartonnés. Paris, 1922-1923.

Etant donné le succès remporté par ces conférences-rapports, on peut prévoir avec quelle impatience leur publication était attendue par tous ceux qui s'intéressent aux progrès de la science. Le premier des ouvrages intitulé « les rayons X » reproduit les sujets traités par M. Maurice de Broglie au cours des trois premières conférences. Après un premier chapitre où il nous rappelle la conception de l'atome telle qu'elle résulte des travaux de Bohr, M. de Broglie passe en revue toutes les découvertes récentes sur la physique des rayons X, découvertes basées sur la propriété qu'ont ces radiations d'être diffractées par les milieux cristallisés. Il nous montre comment ces phénomènes peuvent s'expliquer par nos idées actuelles sur la constitution de l'atome.

Le second volume contient « la théorie des quanta et l'atome de Bhor », par Léon Brillouin. Cet ouvrage qui intéresse surtout ceux qui s'occupent de physique mathématique, nous montre l'état auquel est parvenue et les développements auxquels a été soumise la théorie proposée jadis par Planck pour expliquer les lois du rayonnement.

D'un plus grand intérêt pour les électriciens sera le troisième ouvrage dû à la plume de notre secrétaire général, M. Maurice Leblanc « L'arc électrique », « Les phénomènes thermoioniques » ont déjà trouvé des applications industrielles. Peut-être en auront-ils bientôt d'autres. Il importe donc de bien les étudier.

L'ouvrage de M. Eugène Bloch permettra à ceux que la question intéresse, de faire cette étude d'une façon approfondie.

Nous avons fait allusion plus haut à l'utilisation des phénomènes thermoioniques; le volume de M. Gutton, le dernier de la série, nous présente leur principale application dans « la lampe à trois électrodes ». En 180 pages, le savant professeur nous expose le fonctionnement et nous décrit le mode d'emploi de cet outil merveilleux qui a bouleversé la radiotélégraphie. Toutes les théories concernant la lampe à trois électrodes sont exposées avec une clarté qui ne surprend pas, quand on sait que l'auteur du livre a apporté de nombreuses contributions au sujet qu'il traite.

En résumé, nous sommes persuadés que la publication des conférences-rapports rendra de grands services au développement de la science et de l'industrie française.

Verhandelingen van Dr. P. Zeeman over Magneto-Optische Verschijnselen. —

Un volume 25 cm × 16 cm de XV-341 pages. Leiden, Eduard. Ijdo. 1921.

Le 31 octobre 1896, le professeur Zeeman signalait dans une note à l'Académie royale d'Amsterdam un élargissement des raies spectrales lorsque la source lumineuse étudiée était placée dans un champ intense. Il en donnait une explication par la théorie électromagnétique de la lumière, proposée par Loenz.

Ce phénomène de dédoublement des raies, qui fut immédiatement connu sous le nom d'effet Zeeman a joué un rôle énorme dans le développement de la science moderne.

Aussi, à l'occasion du 25^e anniversaire de cette découverte, un certain nombre de physiciens hollandais prirent-ils l'initiative de rassembler en une brochure les diverses publications faites par Zeeman sur le phénomène qu'il avait découvert et qu'il avait continué à étudier jusqu'en 1913.

Cette brochure vient de nous parvenir. Beaucoup des articles qu'elle contient sont malheureusement écrits dans une langue qui nous est peu familière.

Mais un certain nombre, extraits des archives néerlandaises sont rédigés en français, et tous ceux qui s'intéressent à l'électrooptique les liront avec intérêt. Cet ouvrage est orné d'un portrait du grand physicien hollandais en l'honneur duquel il est édité, et dont un exemplaire lui fut remis, vingt-cinq ans, jour pour jour, après le moment où il fit connaître sa découverte.

Les enroulements Industriels des machines à courant continu et à courant alternatif. Théorie et pratique, par Eugène Marec. — 2^e édition. Un volume 25 cm × 16 cm de IX-286 pages (avec 212 figures). Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Nouvelle édition d'un excellent traité sur la théorie, la construction et la réalisation des principaux types d'enroulements des machines à courant continu et à courants alternatifs, cette édition se différencie des précédentes par quelques suppressions et adjonctions et par l'inversion des deux chapitres V et VI.

Parmi les adjonctions, signalons : la détermination de la ligne neutre dans un moteur à courant continu par recherche de la position des balais, correspondant à l'annulation de la f.e.m. produite par ouverture du circuit d'excitation, et la recherche des défauts dans les bobinages des moteurs asynchrones : rupture d'une phase, court-circuit dans une bobine, contact entre bobine, mise à la masse, etc.

En résumé, ouvrage à recommander à tous ceux qui s'intéressent à la question des bobinages et à leur réalisation pratique.

Les maladies des machines électriques, par E. Schulz. 3^e édition française, traduite sur la 6^e édition allemande par G. Happich, 1 vol. 18 cm × 11 cm, de VI-104 pages. Paris, Dunod, 1923.

Recueil destiné aux ouvriers appelés à mettre en route et à surveiller des moteurs électriques. Après une étude très simple de tous les accidents et défauts possibles, l'auteur a dressé un tableau résumé dont la consultation peut éviter bien des recherches infructueuses.

Tables annuelles de constantes et données numériques. — Vol. IV en 2 tomes (1^{re} et 2^e parties) 29 cm × 22 cm, de XXXII et XXXV-1 377 pages. Paris, Gauthier-Villars, 1922.

Ces deux volumes publiés sous la direction de M. Ch. Marie, docteur ès-sciences, donnent l'ensemble de la documentation numérique, scientifique et technique, publiée dans les périodiques du monde entier depuis 1913 jusqu'à fin 1916.

Elles évitent ainsi des recherches bibliographiques longues et souvent impraticables.

Dans le domaine qui intéresse surtout les électriciens, on y trouve les données numériques publiées sur la conductibilité, les forces thermoélectriques, les constantes diélectriques, le ferromagnétisme, la susceptibilité magnétique, etc.

Elles constituent donc un précieux instrument d'étude qui a sa place dans les laboratoires, comme dans les bibliothèques des industriels.

La publication de ce très intéressant ouvrage ne pourra continuer que si les souscripteurs affluent. Or ils ne sont actuellement que 200. Il est donc à souhaiter que leur nombre s'accroisse fortement.

Formulaire de l'Electricien et du Mécanicien, 30^e édition, par Gaston Roux. Un volume, 19 cm × 12 cm de 1 520 pages. Paris, Masson et Cie, 1921.

A signaler parmi les nouvelles questions traitées dans cette édition :

Les données numériques sur les combustibles en général, et principalement sur les combustibles liquides ; — les qualités que doit présenter l'aluminium employé dans les câbles ; — une note très condensée sur l'équilibrage des réseaux à plusieurs fils ; — des documents concernant les conditions techniques pour la fourniture de l'huile des transformateurs ; — le résumé d'un travail très important sur la consommation d'énergie électrique nécessaire à la fabrication des produits électrochimiques et électrométallurgiques ; — les règles françaises d'unification du matériel électrique ; — les nouvelles dispositions du Code du Travail et de la Prévoyance sociale, en ce qui concerne l'hygiène et la sécurité du travailleur.

Leçons élémentaires sur la gravitation, d'après la théorie d'Einstein, par E.-M. Lémery. Un volume 18 cm × 12 cm de 97 pages. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921.

Professées par l'auteur à la Faculté des Sciences de Marseille, en 1920, ces

Leçons forment la suite naturelle du cours professé en 1915, à la même Faculté et par le même auteur, sur le **Principe de la Relativité**.

S'étant imposé, dans ces Leçons élémentaires, l'obligation de n'employer que les connaissances mathématiques enseignées couramment dans les universités, l'auteur a été conduit à ne pas aborder la Relativité généralisée, et il s'est borné à exposer la théorie de la gravitation dans un champ statique en essayant d'atteindre ce résultat de manière simple, mais en restant dans l'esprit des conceptions d'Einstein.

Le plan de ce travail est le suivant :

Dans le premier chapitre sont rappelées les propositions d'analyse, de géométrie et de mécanique nécessaires pour la suite ; ce chapitre ne contient que des propositions connues et enseignées bien avant l'aurore de la Théorie de la Relativité.

Le chapitre II contient un résumé des notions datant du siècle actuel : univers de Minkowski ; relativité dans le cas des mouvements relatifs uniformes des systèmes de référence.

Le chapitre III, le plus étendu, constitue la partie nouvelle. Dans une première lecture, on pourra débiter par le paragraphe 2 de ce chapitre (Principe d'équivalence). Le lecteur sera aussitôt intéressé par les résultats tangibles de la nouvelle théorie. Revenant ensuite sur ses pas, il pourra trouver — espère l'auteur, — une justification suffisante du point de départ.

Les expressions données ici sont rigoureuses ; il n'est fait d'approximations que pour les évaluations numériques.

Bien que s'adressant surtout aux physiciens, ces Leçons rendront également service à tous ceux qui désirent comprendre rapidement et sans grand effort la nouvelle théorie en faveur.

Les métallurgies électrolytiques et leurs applications, par Albert Levasseur, ingénieur civil A. et M., professeur d'électrochimie et d'électrometallurgie à l'Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielle de Paris et à l'Ecole Bréguet. Un vol. 21 cm x 13 cm de VI-256 pages, avec 22 figures. — Paris, Dunod, 1921.

Suite du traité : « L'Electrochimie et l'Electrometallurgie », du même auteur ⁽¹⁾, où est donnée une vue d'ensemble de l'état actuel de ces industries, le présent ouvrage a un but beaucoup plus spécial. M. Levasseur s'est en effet proposé ici l'étude des principales industries métallurgiques, faisant usage des procédés d'électrolyse, soit par voie humide, soit par voie sèche. En même temps que les questions d'extraction du métal, d'affinage électrolytique, etc., l'auteur a traité les opérations subsidiaires de production des dépôts métalliques, cuivrage, nickelage, zinguage, etc., et les applications particulières telles que la galvanoplastie, la galvanotypie, la protection contre la cémentation, le désétaimage, etc. Dans cette succession de monographies est révélée la situation industrielle véritable des différents procédés. Et loin de donner systématiquement l'avantage aux méthodes électrolytiques, l'auteur expose, chemin faisant, certaines méthodes concurrentes, du moins lorsque l'utilité d'un rapprochement se présente. Enfin, plaçant les fabrications dans leur cadre réel, il a cherché dans la mesure du possible, à indiquer leur avenir probable.

Ainsi conçu, le nouveau traité de M. Levasseur rendra certainement d'appréciables services aux ingénieurs et aux industriels.

Appareils et installations télégraphiques, par E. Montoriol, professeur à l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes. Préface de M. A. Blondel, membre de l'Institut. Un volume, 23 cm x 16 cm, de 625 pages avec 449 figures. Paris, Librairie J.-B. Baillière et fils, 1921.

Cet ouvrage, premier volume paru de l'**Encyclopédie d'Electricité Industrielle**, publié sous la direction de M. A. Blondel, constitue un exposé fort remarquable des appareils et systèmes télégraphiques qui, pour la plupart, sont en usage actuellement.

L'auteur étudie les divers systèmes en les classant — ce qui ne saurait être plus rationnel, — d'après le mode de transmission des signaux ; c'est ainsi qu'il les répartit en trois groupes : 1° ceux à **transmission simple** (systèmes à cadran, Morse, Hughes, etc.) ; 2° ceux à **transmission automatique** (dont le

(1) Voir Bulletins de mai 1919, p. 364, et novembre 1920, p. 397.

Wheatstone est le type); 3° ceux à **transmissions multiples** (Meyer, Baudot et nombreux dérivés, etc.).

Renonçant à la description des appareils anciens, qui aurait allongé démesurément le livre, l'auteur se borne à de sommaires indications lorsque l'exposé du fonctionnement de ces appareils est de nature à faciliter la compréhension des systèmes actuels, ou encore s'ils reposent sur un principe particulièrement intéressant, comme c'est le cas, par exemple, pour certains appareils autographiques ou téléphotographiques. Ont été également omis les appareils étrangers à transmission simple, qui ne diffèrent des nôtres que par des détails de construction.

Après avoir décrit, dans l'ordre indiqué, les trois groupes de systèmes télégraphiques mentionnés plus haut, l'auteur examine les différents moyens d'accroître le rendement des conducteurs, soit à l'aide de dispositifs de décharge, de compensation, etc., soit par l'utilisation des arrangements permettant plusieurs transmissions simultanées, tels que les systèmes duplex, diplex, l'appropriation des circuits téléphoniques aux transmissions télégraphiques, etc. Puis viennent les systèmes rapides (automatiques et multiples), et enfin l'agencement des postes.

L'ouvrage se termine par une comparaison générale des différents systèmes examinés, comparaison fondée sur les leçons de la pratique. Enfin, des notes bibliographiques, placées après chaque chapitre, constituent pour le lecteur une source précieuse de documentation.

Cours d'Électrotechnique, professé à l'Ecole spéciale des Travaux publics, du Bâtiment et de l'Industrie, par A. Iliovici, ingénieur, ancien chef de travaux au Laboratoire central et à l'Ecole supérieure d'Electricité. — Livre I. Lois générales de l'Electricité et du Magnétisme. Un volume 26 cm × 16 cm, de 482 pages, 248 figures. Paris, Librairie de l'Enseignement technique Léon Eyrolles, 1921.

A en juger par ce premier tome, ainsi que par les sommaires des trois autres tomes annoncés, les cours d'électrotechnique que publie M. Iliovici se présente comme l'un des mieux conçus, des plus judicieusement développés, dans le genre et cela ne saurait surprendre les lecteurs du Bulletin, pour qui sont familiers les travaux et la personnalité de l'auteur.

Du fait qu'il s'adressait à des ingénieurs et élèves-ingénieurs, c'est-à-dire à des lecteurs d'une instruction technique forte, mais dirigée vers les applications pratiques, M. Iliovici, tout en utilisant les mathématiques supérieures, a pris soin d'éviter les formules inutiles et les démonstrations vainement compliquées.

Dans le tome I, déjà paru, qui traite des lois générales de l'électricité et du magnétisme, l'auteur a donné un particulier développement aux questions ayant des applications pratiques. En **électrostatique**, par exemple, il a étudié spécialement les capacités des conducteurs et les propriétés des diélectriques, et établi, à titre d'applications, les formules concernant les capacités des conducteurs et les propriétés des diélectriques, ainsi que les formules concernant la capacité des lignes et des câbles à deux ou à plusieurs conducteurs. Dans la même partie de l'ouvrage, l'auteur a donné à l'étude de la répartition des lignes de force et des surfaces équipotentielles dans l'air et dans les diélectriques, l'importance que justifient, et le développement graduel des réseaux et l'augmentation de tension des transports d'énergie. En **magnétisme**, l'auteur a étudié spécialement les propriétés des substances magnétiques, l'influence de la température, de l'état physique et de la constitution chimique, etc. Dans la partie qui traite de l'**électromagnétisme**, sont précisées comme il convient, d'une part la question de l'assimilation des courants aux feuillets magnétiques, d'autre part la question de la différence qui existe entre l'énergie des champs magnétiques créés par les courants et l'énergie des champs des aimants et des feuillets. L'étude du **circuit magnétique** a été développée en indiquant les méthodes les plus pratiques pour déterminer ses éléments. Dans les chapitres consacrés à l'**induction électromagnétique**, sont étudiés, entre autres, les régimes transitoires: fermeture, ouverture ou variation des éléments d'un circuit, les courants de Foucault, les charges et décharges oscillatoires des condensateurs, avec conclusions pratiques concernant l'importance des surtensions et les moyens de les atténuer. Un dernier chapitre traite des **rotations électromagnétiques**, dans lequel l'auteur

donne une vue d'ensemble sur les principes de fonctionnement des moteurs à courant continu ou alternatif.

Quant aux tomes en préparation, ils seront consacrés : le tome II, à l'étude des machines à courant continu, aux piles et accumulateurs, à la distribution et au transport des forces en courant continu ; les livres III et IV, à l'étude des machines et appareils à courants alternatifs. Il n'est point téméraire de prédire, pour l'ensemble de l'ouvrage, le plus justifié des succès.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 3 mai 1893

Présidence de M. RAYMOND.

M. ARMAGNAT décrit l'ohmmètre Carpentier à cadres mobiles et à aimant fixe alimenté par magnéto.

M. DESROZIERS fait une communication sur la transmission et la distribution de la force motrice à propos du concours institué par la Société industrielle de Mulhouse. Il démontre l'avantage qu'il y aurait à substituer des stations centrales électriques aux multiples machines à vapeur des usagers.

Il remarque que les auteurs des projets primés par le jury du concours ont tous rejeté le courant alternatif et adopté le courant continu. L'un des auteurs a même écrit que les courants polyphasés « ont été à la mode ».

Parmi les projets primés, celui de M. DESROZIERS présentait un moteur Coleman vertical à triple expansion avec double dynamo DESROZIERS, l'une shunt et l'autre en série et les deux induits en série.

Le réglage assuré par les génératrices à la Station centrale l'était sur la canalisation à 3 fils par l'emploi d'une boucle à deux conducteurs inversés et de sections décroissantes ; un feeder partait de l'usine pour alimenter au milieu de la boucle deux troisièmes fils placés l'un à droite, l'autre à gauche, entre les deux conducteurs inversés. Le réglage était complété aux réceptrices grâce à l'excitation shunt.

Le projet envisageait 3 circuits différents fonctionnant respectivement à 2 000, 3 000 et 4 000 volts et alimentés par les génératrices en quantité ou en tension, les pertes en ligne étaient égalisées par des compensatrices.

L'auteur remarque qu'il a cherché à réduire la self-induction des génératrices en ne mettant en ligne que les induits, de manière à réduire les effets calorifiques et mécaniques au moment de la rupture d'une ligne.

Il arrive pour le prix de revient du cheval installé à l'usine à un prix moyen de 438 francs et pour le prix de vente du cheval-heure rendu à 0,06-0,09 fr suivant la puissance des réceptrices qui variait de 10 à 500 chevaux.

Il remarque que la durée d'utilisation atteint à Mulhouse 3 000 heures.

Comme mesure de sécurité, il préconise les appareils de la Société de Transport de Force, interposant dans les lignes en cas de rupture ou de court-circuit une résistance hydraulique progressive.

Il se demande s'il y aurait intérêt à répartir les centrales sur les mines de houille et, en se basant sur les données numériques existant en 1893, il conclut par la négative.

Passant à l'examen de l'utilisation des forces hydrauliques il évalue, pour une transmission à 50 km. en courant continu, la tension aux réceptrices à 3 000 volts, la tension aux génératrices à 3 400 volts le rendement à 50 pour 100 et le prix d'utilisation du cheval à 250 fr., transport compris.

Pour une transmission à 100 km, les nombres respectifs deviennent 5 000, 8 000, 1 400.

Il conclut enfin qu'on aurait dû faire un plus grand effort pour l'utilisation des courants continus.

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. HENRIOT - 20, RUE CERNET, PARIS

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15°)

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15°)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.
Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS
SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
ÉDITEUR
12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8°

1923

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de:

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en France

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

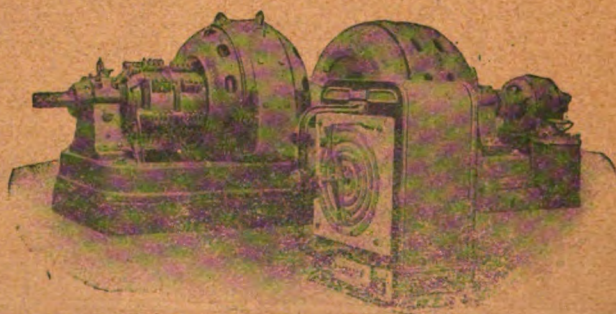
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

ESSAIS CONTROLÉS DE VÉHICULES A TRACTION ÉLECTRIQUE PAR ACCUMULATEURS

organisés par l'Union des Syndicats de l'Electricité, boulevard Malesherbes, 25, à Paris, avec le concours de la Commission technique de l'Automobile-Club de France et de l'Office National des Recherches Scientifiques et Industrielles et des Inventions.

COMMISSAIRE GÉNÉRAL : M. FERRUS, président de la Commission technique de l'Automobile-Club de France.

COMMISSAIRES GÉNÉRAUX ADJOINTS : MM. LUMET, secrétaire de la Commission technique de l'Automobile-Club ; ACCLAIR, président du Comité de Mécanique à l'Office National des Recherches Scientifiques et Industrielles.

RÈGLEMENT (1)

ARTICLE PREMIER. — L'Union des Syndicats de l'Electricité, en collaboration avec la Commission technique de l'Automobile-Club de France et l'Office National des Recherches Scientifiques et Industrielles et des Inventions organise des essais contrôlés de véhicules à traction électrique par accumulateurs.

Ces essais auront lieu dans la région parisienne du 25 septembre au 10 octobre 1923.

Après la fin de l'épreuve, les véhicules seront exposés à Bellevue, au siège de l'Office National, du 11 au 14 octobre.

(1) Arrêté le 18 avril 1923 par la 5^e Commission et approuvé le 2 mai suivant par le Comité de Direction de l'Union des Syndicats de l'Electricité.

ART. 2. — *Catégories.* — Les véhicules seront classés, suivant la charge utile qu'ils peuvent transporter, en 5 catégories :

- 1^{re} catégorie : charge utile de 0 à 500 kg ;
- 2^e catégorie : charge utile de 501 à 1.500 kg ;
- 3^e catégorie : charge utile de 1.501 à 3.000 kg ;
- 4^e catégorie : charge utile de 3.001 à 5.000 kg ;
- 5^e catégorie : charge utile de 5.001 kg et au-dessus.

Chaque catégorie pourra se subdiviser suivant le type de l'accumulateur (plomb, fer — nickel, cuivre, etc.) et suivant que le parcours sera effectué avec ou sans recharge partielle de la batterie.

ART. 3. — *Objet des essais. Mesures.* — Les essais ont pour objet de déterminer pour chaque véhicule la consommation d'énergie électrique :

- 1^o par tonne-kilomètre utile ;
- 2^o par tonne-kilomètre totale.

Ils comporteront en outre l'observation de la régularité de marche.

Entre autres renseignements, on notera le poids de la batterie ; sa capacité nominale pour un régime de décharge de 5 heures ; sa consommation d'énergie pendant les charges effectuées au cours des essais.

Les résultats seront publiés, sous réserve de l'agrément de chaque participant en ce qui concerne la publication de ses propres résultats.

ART. 4. — *Appareils de mesure.* — La mesure de la consommation sera enregistrée par des appareils placés sur la voiture et fournis par l'U. S. E. Ces appareils seront étalonnés par le Laboratoire Central d'Electricité.

ART. 5. — *Dépense d'énergie.* — La dépense d'énergie électrique sera supportée par les participants.

ART. 6. — *Parc.* — Les véhicules devront porter d'une manière apparente le numéro d'ordre qui leur sera indiqué ; les chiffres seront peints en blanc sur fond foncé et devront avoir au moins 25 centimètres de hauteur.

Les véhicules seront garés la veille du début de l'épreuve et pendant toute la durée de cette dernière, dans un parc comportant des postes de charge pour les accumulateurs et situé à Bellevue, à l'Office National des Recherches Scientifiques et des Inventions.

Pendant l'épreuve les véhicules seront placés sous le régime des parcs fermés.

ART. 7. — *Charge et recharge des accumulateurs.* — Chaque participant devra faire établir lui-même les tableaux de charge de ses voitures, conformément aux indications qui lui seront données par l'U. S. E. Ces

tableaux devront être remis le 1^{er} septembre au plus tard à l'Office National des Recherches Scientifiques et des Inventions à Bellevue (Seine) et seront réceptionnés par le Laboratoire Central d'Electricité.

La charge des accumulateurs sera faite par le constructeur du véhicule sous la surveillance des commissaires préposés aux essais.

Elle ne pourra être faite qu'entre 19 et 7 heures.

Les recharges partielles ne pourront être faites qu'au parc et entre midi et 13 h. 12.

ART. 8. — *Entretien et réparations.* — Le conducteur du véhicule ou, à son défaut, un remplaçant, pourra seul et sans aide procéder à la visite et aux réparations mécaniques de son véhicule pendant les deux heures qui suivront la rentrée au parc.

Toute opération d'entretien des accumulateurs autre que l'entretien de l'électrolyte ne pourra se faire qu'en présence et avec l'autorisation d'un commissaire spécialement désigné qui en dressera le compte rendu. Pour assurer le contrôle dans ces conditions, les batteries seront fermées et plombées, sauf les orifices nécessaires à la fuite des gaz et à l'entretien de l'électrolyte.

L'entretien et la manipulation des accumulateurs ne pourront être faites que pendant les deux heures qui suivront la rentrée au parc. Le conducteur du véhicule pourra se munir du matériel utile et se faire aider dans son travail par le personnel nécessaire.

En cours de route, les seules réparations autorisées seront obligatoirement effectuées par les moyens du bord et seulement par le conducteur du véhicule.

Toute dérogation à ces prescriptions du règlement fera l'objet d'une mention spéciale dans le rapport sur l'épreuve.

ART. 9. — *Horaires.* — L'épreuve sera effectuée d'après un horaire déterminé et publié avant le commencement des essais.

Le parc ne sera ouvert que de 8 à 19 heures, sauf pour le personnel préposé à la charge des accumulateurs.

A l'heure précise prévue à l'horaire, le véhicule sera considéré comme ayant pris le départ.

Le retour au parc devra être effectué au plus tard à 17 heures.

Un arrêt d'une heure et demie à Bellevue sera obligatoire pour tous les véhicules au passage du nœud de la boucle dont il est question ci-dessous.

ART. 10. — *Itinéraires et prescriptions de route.* — Un plan donnera les itinéraires journaliers comprenant des points caractéristiques où les

commissaires de bord noteront les passages des véhicules et l'heure de ces passages.

Ces itinéraires seront en forme de 8, le nœud de la boucle étant à Bellevue, où se feront les départs et les rentrées.

La durée totale de l'épreuve sera de 10 jours et le parcours journalier minimum à accomplir avec ou sans recharge partielle par chaque véhicule sera :

De 80 km pour la 1^{re} catégorie.

De 70 km pour la 2^e catégorie.

De 60 km pour la 3^e catégorie.

De 50 km pour les 4^e et 5^e catégories.

Les freins des voitures devront être tels que la vitesse maxima en descente ne sera en aucun cas supérieure de plus de 30 0/0 à la vitesse normale du véhicule.

D'ailleurs, les arrêtés municipaux relatifs aux allures sur les voies parcourues devront être rigoureusement observés.

ART. 11. — *Commissaire de bord.* — Chaque véhicule aura à bord, outre le conducteur, un commissaire pour lequel un siège confortable et abrité de la pluie devra être aménagé. Ce commissaire, qui ne devra jamais abandonner la voiture, relèvera les indications des appareils de mesure au départ, aux points caractéristiques de l'itinéraire, et à l'arrivée.

Le commissaire notera sur une feuille de route, qui lui sera remise en temps utile, les heures de départ, de passage aux points caractéristiques et d'arrivée, et en général, tous les incidents de la route.

ART. 12. — *Charge utile.* — La charge utile pour toutes les voitures engagées dans l'épreuve se composera exclusivement, outre le poids du commissaire afférent à chaque voiture et estimé à 70 kg, de caisses de gravillon arrimées sur les voitures et solidement fermées, dont le poids sera uniformément de 35 kg.

Ces caisses seront fournies par le concurrent.

Une caisse d'appoint sera autorisée s'il y a lieu.

Le poids du conducteur sera compté comme poids mort.

De fréquentes vérifications du poids transporté seront effectuées.

Pour les voitures de transport de voyageurs, les voyageurs qu'elles sont déclarées susceptibles de transporter seront représentés obligatoirement par des caisses de gravillon de 35 kg à raison de 70 kg par voyageur. Ces caisses seront placées à l'endroit même où seraient les voyageurs qu'elles représentent.

ART 13. — *Pesées.* — Les véhicules seront pesés à vide

Le poids à vide comprendra le poids du châssis et de la carrosserie, celui

de la batterie, celui du conducteur, le poids de l'outillage, le poids des pièces de rechange y compris les roues et bandages de rechange.

Le poids de la charge utile sera obligatoirement compris dans les limites spécifiées pour la catégorie dans laquelle est inscrit le véhicule et devra rester le même pendant toute la durée de l'épreuve.

Les véhicules ayant été tout d'abord pesés à vide, le poids de la charge utile sera vérifié par une pesée du véhicule chargé.

ART. 14. — Un inventaire des pièces de rechange emportées à bord sera établi par le constructeur, et le commissaire du bord prendra cet inventaire en charge. Il contrôlera l'emploi éventuel des pièces.

Les pièces avariées et remplacées prendront dans le chargement la place des pièces neuves utilisées. Elles devront être représentées.

A la fin de l'épreuve l'inventaire sera contrôlé.

ART. 15. — Une annexe au règlement déterminera ultérieurement les conditions pratiques de l'épreuve.

ART. 16. — *Modifications au règlement.* — Les organisateurs se réservent le droit d'apporter au présent règlement toutes modifications qu'ils jugeront utiles.

ART. 17. — *Inscription et droit d'engagement.* — Les constructeurs désirant participer aux essais devront se faire inscrire à l'Union des Syndicats de l'Electricité, boulevard Malesherbes, 25, à Paris, avant le 30 juin 1923, en indiquant le nombre et la nature des véhicules qu'ils présenteront.

Des inscriptions pourront toutefois être reçues jusqu'au 31 juillet, mais le droit d'inscription sera majoré de 50 0/0 pour les engagements qui parviendront entre le 1^{er} et le 15 juillet, et de 100 0/0 pour ceux qui parviendront entre le 16 et le 31 juillet.

Du fait de leur inscription à l'épreuve, les constructeurs s'engagent à observer le présent règlement.

Un droit d'engagement sera versé par les constructeurs au moment de leur inscription. Ce droit sera par véhicule de :

500 francs pour la 1 ^{re} catégorie.			
750	—	—	2 ^e —
1.000	—	—	3 ^e —
1.250	—	—	4 ^e —
1.500	—	—	5 ^e —

Les sommes ainsi versées resteront acquises à l'Union des Syndicats de l'Electricité, alors même que le véhicule ne participerait pas à l'épreuve pour quelque cause que ce soit.

ART. 18. — Dans la formule d'engagement qu'ils signeront, les constructeurs devront spécifier :

Qu'ils dégagent les organisateurs de toutes responsabilités et prennent celles-ci à leur charge ;

Qu'ils se sont assurés à une Compagnie d'assurances notoirement solvable contre tous les accidents causés soit à eux-mêmes, soit au commissaire placé à bord de leur véhicule, soit à des tiers (la police d'assurances devra être produite avant le départ, sous peine d'exclusion de l'épreuve);

Qu'ils déclarent accepter toutes décisions des organisateurs concernant l'application du règlement et s'engagent à ne s'adresser en aucune circonstance aux tribunaux.

L'engagement devra être accompagné d'un tableau de renseignements fourni par le constructeur et conforme à un modèle qui sera établi par l'Union des Syndicats de l'Electricité.

ART. 19. — *Responsabilités.* — Les organisateurs déclinent toutes responsabilités, de quelque nature qu'elles soient, étant entendu que celles-ci incombent au constructeurs ayant engagé leur véhicule.

Imprimerie DESHAYES, 83, Rue de la Santé, Paris.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 6 juin 1923; Admission de membres titulaires, p. 249. — Notes sur les effets physiologiques et actiniques de la lumière au mercure (MM. MAURICE LEBLANC fils et Docteur BROCA), p. 251. — Essais de véhicules à traction par accumulateurs (M. TRIBOT-LASPIÈRE), p. 255; Observations (M. DE LA VALETTE), p. 258. — L'exposition de physique et de T. S. F. (M. DE VALBREUZE), p. 260.

INFORMATIONS : Travaux des Sections, p. 262.

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES, p. 268.

BIBLIOGRAPHIE, p. 273.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 276.

IL Y A TRENTE ANS., p. 279.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 6 juin 1923. (1)

Présidence de M. P. ESCHWEGE

La séance est ouverte à 20 h 30.

M. le Jonkher Tjarda van Starkenborgh, secrétaire de la légation du Royaume des Pays-Bas, assiste à la séance et prend place au Bureau.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes:

MM.

Arethus (Claude), ingénieur au Service des Essais, Compagnie Electro-Mécanique, Usine du Bourget, 61, rue de la Forge, à Noisy-le-Sec (Seine). — Présenté par MM. Beauregard et Costedoat.

Carotte (Maurice-Edouard-Constant), élève à l'E. S. E., 209, rue de la Croix-Nivert, Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Hughes** (Jean-Clovis-Antoine), directeur de la Compagnie d'Electricité de Montpellier, impasse du Jeu-de-Ballon, à Montpellier (Hérault). — Présenté par MM. Tardy de Montravel et Grosselin.
- Jouvet** (Jean-Marcel), lieutenant du Génie, élève à l'E. S. E., 94, boulevard Garibaldi, Paris (15°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Le Blanc** (A.), représentant de la Compagnie française pour l'Exploitation des Procédés Thomson-Houston, International General Electric C^o. Inc. Schenectady, New-York (U. S. A.). — Présenté par MM. Grosselin et Leblanc fils.
- Petit** (Georges-Théodore-Emile), lieutenant du Génie, élève à l'E. S. E., 6, rue Etienne-Marcel, Paris (2°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

L'ordre du jour appelle les communications techniques :

NOTES SUR LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES ET ACTINIQUES
DE LA LUMIÈRE AU MERCURE

L'auteur répond à une observation antérieure de M. Broca, qui déconseillait l'emploi de la lampe à vapeur de mercure sous le prétexte que ses radiations sont nocives et, de plus, ne permettent pas d'obtenir des photographies artistiques. Or, non seulement les ouvriers éclairés par de telles luminaires, mais encore ceux préposés aux essais des tubes, n'ont jamais éprouvé aucun malaise, ce qui détruit le premier grief ; quant au second, il tombe de lui-même devant les résultats des expériences qui montrent que le ternaire rouge, vert, bleu, a très sensiblement la même composition dans l'arc au mercure que dans la lumière solaire ; il n'y a donc pas de raison pour que cette source artificielle donne de moins bonnes photographies et, en fait, certains praticiens en tirent des clichés excellents.

M. Maurice LEBLANC. — « Au cours d'observations faites à la suite de la communication de M. Bossu sur « l'Eclairage des Studios », M. Broca a recommandé d'éviter l'éclairage des lampes à vapeur de mercure parce que ces lampes sont dangereuses pour les yeux et parce que, d'autre part, elles ne permettent d'obtenir que de mauvaises photographies.

» En ce qui concerne leur action physiologique, je me contenterai d'opposer aux dires de M. Broca les propres conclusions des études qu'il avait entreprises avec M. Laporte sur les différentes sources industrielles, et qui ont été publiées dans le bulletin de notre Société (2^e série, tome VIII, N^o 76, 1908, et 3^e série, tome III, N^o 22, 1913).

» Dans la communication de 1908, M. Broca dit à propos de la lampe à mercure à tube de verre : « Les différentes sources lumineuses se classent pour la constriction pupillaire et la persistance des images résiduelles, suivant l'ordre de leur éclat respectif. Cependant, l'arc au mercure qui était, parmi les lampes que nous avons étudiées, celle du plus faible éclat, cause une contraction de la pupille importante, il ne présente donc pas tout l'avantage qu'on aurait pu attendre ; *il ne présente, cependant, aucun inconvénient hygiénique* ». En fait, la lampe à mercure était la source donnant lieu à la plus faible constriction pupillaire et à la plus courte durée d'image résiduelle. M. Broca dit plus loin :

« L'éclat de l'arc au mercure est plus petit encore, 1,8 bougie
» par centimètre carré ; malgré cela, il produit une constriction
» pupillaire relativement considérable. Cela tient certainement
» à la nature des radiations qu'il émet et qui sont très fatigantes

» pour l'œil à égalité d'éclat. Mais nous ne devons juger que
 » l'effet global, et dans les conditions où nous nous sommes
 » placés, l'arc au mercure est tout à fait analogue, en fin de
 » compte, aux autres lumières. Nous réservons d'ailleurs complè-
 » tement la question relative aux effets à longue échéance de
 » cette lumière. Il est cependant probable qu'elle est équivalente
 » aux autres ».

» Mon expérience personnelle me permet de confirmer ce ver-
 dict : des ouvriers ont pu travailler pendant dix ans dans des
 ateliers seulement éclairés par ce procédé sans accident et, d'autre
 part, j'ai vu un même ouvrier pendant plusieurs années exami-
 ner tout le jour des tubes placés pour essais sur des herbes,
 portant les uns à côté des autres une dizaine de tubes de 1 000
 bougies.

» M. Broca dit, d'autre part, que la fatigue causée à l'œil par
 les lumières sensiblement monochromatiques peut être expliquée
 dans la théorie de Young Helmholtz, qui considère l'action de la
 lumière sur la rétine comme le résultat de trois processus indé-
 pendants.

» Mais si, adoptant ce point de vue, on compare les valeurs rela-
 tive des excitations de ces trois sensations primaires qui, par leur
 superposition, donnent la sensation colorée produite par la
 source en se reportant aux nombres de Ives que l'on trouvera
 dans les pages rédigées sur ce sujet par M. Blondel pour le Re-
 cueil de Constantes physiques, on constate que la lumière de
 l'arc au mercure est celle qui se rapproche le plus de celle du
 jour.

	Sensation primaire		
	rouge	verte	bleue
Ciel bleu	0,29	0,30	0,41
Arc électrique	0,29	0,30	0,41
Ciel couvert	0,35	0,34	0,31
Arc au mercure.....	0,41	0,36	0,23
Lampe à incandescence (filament de tungstène à 1,25 watt par bougie).....	0,48	0,41	0,11

» Ces nombres doivent se rapporter à l'arc à vapeur de mer-
 cure à basse pression tel qu'on l'obtient dans les tubes de verre
 et non à l'arc à haute pression des lampes en quartz, qui, par
 comparaison avec le premier, paraît donner une lumière beau-
 coup plus verte. Au sujet de celui-ci, M. Broca dit, dans sa com-

munication de 1913 : « Nous avons étudié la lampe à mercure » en quartz dans les conditions mêmes de son usage, c'est-à-dire » avec son globe diffuseur réglementaire. Nous avons trouvé que » cette source prise dans ces conditions était d'un usage excel- » lent, car sa présence dans le champ indirect de la vision laisse » une pupille de 5 mm et les images accidentelles produites par » une contemplation d'une demi-seconde ont une durée moyen- » ne de 19 secondes seulement. » Et, plus loin, aux conclusions : « La lampe à mercure en quartz munie de son globe règlemen- » taire est une source équivalente pour l'hygiène de l'œil aux » autres sources que nous avons étudiées dans notre précédent » mémoire ».

» De ce que les objets éclairés par une lumière ne contenant qu'un petit nombre de radiations ne présentent pas à l'œil les mêmes colorations qu'en lumière blanche, il ne résulte pas qu'on ne puisse pas faire avec une telle lumière convenablement choisie d'excellentes photographies.

» Si celles-ci ne reproduisent jamais exactement les différences d'intensité que l'œil observe entre deux colorations différentes, c'est que la courbe de sensibilité de la plaque photographique dans le spectre est toute différente de celle de l'œil. Si la plaque n'est pas sensible aux rayons rouges, les lèvres d'un sujet seront noires sur la photographie, qu'il ait été éclairé en lumière verte ou en lumière blanche. Peu importe donc d'éclairer le sujet avec des lumières contenant plus ou moins de radiations non actiniques, l'important est qu'il existe entre les proportions des diverses radiations actiniques contenues dans la source de lumière artificielle utilisée et la lumière du jour, un rapport égal à l'inverse de celui des sensibilités de la plaque et de l'œil pour les radiations considérées.

» A ce point de vue, la lumière de mercure convient mieux que celle des lampes à incandescence dans laquelle les radiations vertes sont trop intenses par rapport aux radiations bleues.

» En fait, un très grand nombre d'excellents photographes utilisent les tubes à mercure avec les meilleurs résultats. Ces tubes sont munis généralement de réflecteurs fluorescents qui corrigent la couleur de la lumière, mais c'est bien plutôt pour calmer les appréhensions des clients inquiets de l'aspect que leur donne cette lumière inaccoutumée, que pour obtenir un effet photographique différent de celui obtenu avec les tubes nus ».

M. BROCA. — « M. Maurice Leblanc fils m'a accusé de sévérité envers la lampe à mercure. Je ne crois pas qu'il ait eu raison, car ce que j'ai dit n'est que le résumé sans réserve de ce que M. Leblanc a extrait des mémoires que Jouaust, Laporte et moi avons publiés.

» En ce qui concerne les nombres d'Ives, M. Leblanc n'a pas donné ceux qui sont relatifs à la lumière solaire même, qui est la lumière par excellence pour laquelle notre œil est fait. La fraction de bleu, dans ce cas, est 0,25 au lieu de 0,41 pour la lampe à mercure ou le bleu du ciel. Le rapport de 0,25 à 0,41 est suffisant pour qu'il soit raisonnable d'admettre mon hypothèse sur la fatigue sélective, surtout en rapprochant ces résultats de ceux que donne le néon.

» En ce qui concerne la photographie, M. Leblanc dit, avec juste raison, que les films actuels ne donnent pas de plus mauvais résultats quand ils sont éclairés par la lampe à mercure que quand ils le sont par les lumières d'autre nature. Je crois cependant devoir maintenir mes conclusions précédentes : les films panchromatiques éclairés par une lumière analogue à celle du jour (et non du ciel bleu) donnent un modelé infiniment plus artistique que les films actuels, et le progrès le plus important à poursuivre actuellement est celui de la réalisation de films panchromatiques assez sensibles pour l'impression desquels on utilisera la lumière blanche normale et l'objectif hyperchromatique de Polack. »

SUR LES ESSAIS DE VÉHICULES A TRACTION PAR ACCUMULATEURS
ORGANISÉS PAR L'UNION DES SYNDICATS DE L'ÉLECTRICITÉ

Dans cette communication, l'auteur fait part du programme des expériences de traction par accumulateurs, qui doit avoir lieu en octobre prochain, sous les auspices des groupements les plus qualifiés pour donner à cette manifestation toute l'importance qu'elle comporte.

M. TRIBOT-LASPIÈRE. — « M. Grosselin a bien voulu me demander de vous donner une courte communication sur les essais de traction électrique par accumulateurs organisés par l'Union des Syndicats de l'Electricité. Bien que beaucoup d'autres personnes eussent été mieux qualifiées que moi pour cette communication, c'est avec plaisir que j'ai accepté son aimable proposition.

» L'Union des Syndicats de l'Electricité, son titre même l'indique suffisamment, est composée de syndicats professionnels et elle ne groupe que des industriels. C'est donc en industriel qu'elle traite les problèmes qui lui sont posés et c'est ce caractère qui domine dans les essais dont je vais vous parler.

» En se proposant de développer sous toutes leurs formes les applications de l'électricité et, en particulier, la traction électrique par accumulateurs, l'Union cherche à servir à la fois les intérêts des constructeurs de matériel qui trouveront là un nouveau débouché pour les moteurs, les accumulateurs, l'appareillage électrique des véhicules et les intérêts des exploitants de réseaux, qui auront l'occasion de vendre, surtout la nuit, de nouvelles quantités de courant.

» Mais elle accomplira, en outre, un véritable devoir national, — et elle attache naturellement la plus grande importance à ce point de vue, — en contribuant à répandre l'emploi de l'électricité comme force motrice et à réduire les importations d'essence qui imposent à notre pays une si lourde contribution vis-à-vis de l'étranger.

» L'Union envisage avec confiance l'avenir, convaincue que c'est l'électricité qui apparaîtra bientôt comme étant le fameux « carburant national » que nos ressources hydrauliques fourniront au pays sans jamais se tarir.

» Avant d'étudier la traction par accumulateurs, nous avons fait une enquête approfondie à l'étranger et nous avons appris que les véhicules à traction par accumulateurs sont au nom-

bre de 180 000 aux Etats-Unis, de 3 000 en Angleterre et en Italie, et de plusieurs milliers en Allemagne. Nous avons constaté en outre que dans ces pays, il y avait unanimité pour admettre que les dépenses de force motrice, quand on emploie l'énergie électrique, sont inférieures de 20 à 30 pour 100 aux dépenses d'essence. Il est donc absolument certain que l'emploi des véhicules à traction par accumulateurs est beaucoup plus économique que l'emploi de véhicules à moteur à essence.

» Dans ces conditions, la voie qui s'imposait à l'Union était toute tracée ; il fallait porter ces faits à la connaissance du public français et lui montrer par une expérience évidente et contrôlable que notre pays est en mesure de fournir les véhicules de toute espèce qui peuvent être actionnés par l'énergie électrique. On ne s'étonnera pas de cette affirmation, si on veut bien se souvenir que la France a été le berceau de la traction par accumulateurs et que ses premiers essais remontent à 1890. Seuls, certains malentendus et certaines interprétations erronées ont fait croire au public, mal informé, que la traction par accumulateurs n'était pas pratique. Il convient de redresser à ce sujet l'opinion.

» Les essais auront lieu du 25 septembre au 10 octobre prochain, et 20 véhicules y prendront part, allant de la camionnette au gros camion de 5 tonnes de charge utile. C'est à l'Office national des Recherches et des Inventions, à Bellevue, que seront établis le parc et la station de charge. Les itinéraires seront en forme de 8, le centre de la boucle étant installé à Bellevue.

» C'est donc l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions, organisme officiel, qui centralisera l'épreuve. Première garantie.

» La partie électrique: appareils de mesure, station de charge, vérification et contrôle des accumulateurs, est confiée au Laboratoire central d'Electricité. Deuxième garantie.

» Tout ce qui concerne le côté « automobile » et notamment le tracé des itinéraires, l'observation du règlement, est confié à MM. Ferrus et Lumet, respectivement président et secrétaire de la Commission technique de l'Automobile Club de France. Troisième garantie.

» Enfin, le Ministère de la Guerre, très intéressé par nos essais,

a décidé de faire accompagner chaque véhicule par un officier ou un sous-officier. Quatrième garantie.

» J'ajoute que le Commissaire général des Essais sera M. Ferrus, ci-dessus nommé. MM. Lumet, ci-dessus désigné, et Aulclair, président du Comité de Mécanique de l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions, seront commissaires généraux adjoints.

» Vous voyez que l'Union des Syndicats de l'Electricité a pris les précautions les plus sévères pour que toutes les voitures soient assurées de trouver dans nos essais le contrôle le plus impartial et le plus rigoureux.

» La 5^e Commission de l'Union des Syndicats de l'Electricité, qui est chargée de l'organisation des essais et qui a la bonne fortune d'être présidée par M. Eschwège, avait d'abord envisagé l'organisation d'un *concours*. Mais, à l'examen, il lui a paru qu'il y avait intérêt à ne pas prescrire des conditions trop sévères, qui risqueraient peut-être d'écarter certains constructeurs nouveaux. Elle a voulu procéder seulement à des expériences et son règlement a été rédigé d'une manière très libérale. Elle a voulu que chaque constructeur soit en mesure de montrer que tel ou tel de ses véhicules est apte à réaliser tel ou tel service : certains constructeurs vont nous montrer des camionnettes légères permettant de faire un service d'une vingtaine de kilomètres le matin, pouvant se recharger partiellement pendant le temps du déjeuner du chauffeur et pouvant parcourir l'après-midi vingt autres ou même trente autres kilomètres. D'autres vont pouvoir faire vérifier expérimentalement que leurs voitures sont prêtes au service de remise ; d'autres nous montreront des camions capables de faire 80 km au moins sans recharge, etc...

» Et il est même possible que notre Commission autorise les véhicules, une fois rentrés au parc, à continuer à rouler jusqu'au moment où leurs batteries seront épuisées : ils pourront ainsi montrer quelle réserve d'énergie leur restait encore au moment où ils avaient terminé le parcours qui leur était imposé.

» Ces essais se présentent donc comme tout à fait industriels. Néanmoins, le côté scientifique ne sera naturellement pas laissé de côté et nous pensons que les résultats obtenus seront des plus intéressants à consulter. Nous pourrions peut-être vous donner

l'hiver prochain des détails complets sur les appareils que nous aurons utilisés et sur les méthodes que nous aurons employées.

» Tel est l'esprit des expériences de traction par accumulateurs qui sont organisées par l'Union des Syndicats de l'Electricité. Vous pourrez utilement compléter les indications que je viens de vous donner en parcourant le texte in-extenso du règlement des essais encarté dans le présent numéro.

OBSERVATIONS AU SUJET DE LA COMMUNICATION PRÉCÉDENTE

M. DE LA VALETTE. — « Les remerciements de notre Président diront mieux que je ne pourrais le faire, l'intérêt de la communication qui vient de nous être faite par notre distingué camarade M. Tribot-Laspière.

» Les usagers de la route se réjouiront avec nous du programme très complet qui nous annonce la renaissance des véhicules électriques.

» Comme l'a fort bien dit le conférencier, nous avons le regret de constater, dans les documents qu'il nous apporte, que plusieurs pays étrangers sont largement en avance en ce qui concerne l'emploi des voitures automobiles électriques sur route, comme d'ailleurs sur rail.

» Mais ne convient-il pas, lorsque l'occasion s'en présente, de se faire justice et de rappeler que les premiers essais de moteurs électriques appliqués aux véhicules automobiles ont été effectués en France par de savants compatriotes qui ont déterminé tous les problèmes que la question comportait et qui ont donné, chacun, une solution personnelle qu'on peut retrouver dans toutes les applications étrangères ?

» De 1889 à 1892 nous pouvons citer entre autres, les brevets et les essais de Trouvé, Sartia, Blanche, Dujardin, Graffigny, Vincent, Jablochkoff, Poncet, la Société pour le Travail électrique des métaux..., qu'on me pardonne mes oublis !...

» Puis, à partir de 1891, apparaissent les véhicules électriques qui portent des noms qui nous sont familiers, Jeantaud (1891), Krieger (1895), Pouchain (1896), etc...

» Nous avons vu naître la locomotion électrique sur route en France, disons-le bien haut.

» La voiture munie d'un moteur à combustion interne, également mise au point en France à partir de 1893, présentait une telle souplesse et une telle indépendance, qu'elle détournait l'attention des véhicules électriques.

» Les pays étrangers, privés de nos « belles routes de France » d'alors... réduits à la circulation urbaine, n'avaient pas la même raison pour renoncer à la traction par accumulateurs. Pendant que nous préparions l'avenir de la locomotion et de l'aviation par les épreuves annuelles des temps historiques, concours et courses automobiles 1894, 1895, 1896 et suivantes et les champs d'aviation de Reims (1908), qui ont porté à un si haut degré de perfection le moteur à essence, les étrangers utilisaient nos travaux et apprenaient à leur public à se servir de la voiture électrique.

» Notre collègue Tribot-Laspière nous annonce la reprise des études relatives à la voiture électrique, sous la présidence de M. Eschwège, bien qualifié pour apprécier les progrès réalisés, non seulement en raison de sa haute compétence, mais aussi parce qu'il a eu l'occasion de participer aux travaux de quelques-uns des précurseurs dont j'ai cité les noms.

» Nul doute que nos constructeurs ne bénéficient de l'expérience acquise et que nous ne constatons dans l'utilisation du véhicule électrique l'essor qu'il mérite de par les qualités et les avantages si bien mis en relief par M. Tribot-Laspière.

» Mais n'oublions pas, permettez-moi de le rappeler, que la voiture électrique est née en France.

» Puisqu'elle nous revient, heureusement, ce sera pour recevoir une nouvelle et définitive impulsion, grâce à l'énergie et au talent des nouveaux collaborateurs qui se grouperont à l'occasion des expériences annoncées pour septembre 1923.

M. le PRÉSIDENT remercie MM. Tribot-Laspière et de la Valette.

EXPOSITION DE PHYSIQUE ET DE T. S. F.

M. de Valbreuze informe ses collègues que la Société française de Physique organise, à l'occasion de son Cinquantenaire, une Exposition nationale de Physique et de T. S. F., avec l'appui et sous le patronage du Conservatoire national des Arts et Métiers, de l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions, et des groupements scientifiques et professionnels intéressés.

Cette Exposition qui « englobera toutes les applications scientifiques, industrielles et commerciales de la Physique », aura lieu à Paris, au Grand Palais, du 30 novembre au 17 décembre 1923.

Le Comité directeur, chargé de la préparation et de l'organisation de l'Exposition, comprend, outre les Présidents des Groupes:

MM. Emile Picard, président d'honneur ; F. Brylinski, président ; R. de Valbreuze, délégué général ; Zetter, trésorier ; H. Abraham, H. Cahen, E. Chamon, Delaunay, A. Dennery, L. Dunoier, C. Fabry, P. Langevin, R. Mesny, W. de Rechniewski, E. Schwarberg.

Nos sociétaires ont trouvé, dans un précédent numéro, un encartage relatif à cette exposition, leur donnant tous détails sur son organisation.



M. TOULON, secrétaire de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.

« Mes chers collègues, J'espère que vous voudrez bien nous faire l'honneur d'assister aux fêtes que nous donnons à l'occasion de notre anniversaire.

» Nous avons deux séances : le vendredi à 10 heures, et le samedi à 10 heures. Dans la séance de vendredi seront données plusieurs communications dont vous trouverez les détails dans le programme. Samedi à 10 heures, séance solennelle sous la présidence du Président de la République, M. Millerand, accompagné de M. Dior, des représentants de plusieurs autres Ministères, et du ministre de l'Instruction publique. Vous êtes invités à assister à ces 2 séances.

». Je vous rappelle que ces fêtes sont données à l'occasion de l'anniversaire de la fondation de notre Société, fondation qui remonte à 1801, il y a 122 ans, et du 100^e anniversaire de sa déclaration d'utilité publique qui a eu lieu en 1822 ; c'est surtout à l'occasion de ce centenaire que cette manifestation solennelle a été organisée.

M. le PRÉSIDENT remercie M. Toulon de son aimable invitation et le prie de vouloir bien transmettre ses remerciements au Comité de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.

INFORMATIONS

TRAVAUX DES SECTIONS

1^{re} SECTION. — *Production de l'Electricité*

Dans sa séance du mercredi 6 juin, sous la présidence de M. Roth, la 1^{re} Section a entendu M. Beuque, sur l'état actuel de la question des surtensions, tel qu'il ressort d'articles publiés en Allemagne.

Les conclusions des auteurs diffèrent, d'ailleurs, souvent, suivant les firmes auxquelles ils appartiennent.

Par exemple, les bobines Petersen, préconisées par certains, paraissent à d'autres être d'une efficacité douteuse et avoir l'inconvénient de maintenir artificiellement des exploitations établies dans des conditions foncièrement mauvaises.

La tendance paraît se répandre de renforcer les isolants des transformateurs pour donner à la résistance disruptive la même valeur dans les enroulements qu'entre les bornes.

La Section a décidé d'ouvrir, sur ce point, une discussion générale, en séance de la Société, au cours de l'hiver prochain ; les représentants des sociétés exploitantes seront priés d'y prendre part.

Puis, M. Jouaust a exposé les résultats obtenus par Mlle Bourgoignon au Laboratoire central d'Electricité, sur la variation des pertes totales dans les tôles en fonction de l'induction.

Il en a tiré la conclusion que, dans certaine catégorie de tôles, les pertes totales varient comme le carré de l'induction et que, dans une autre catégorie, elles varient beaucoup plus vite.

Il est donc possible d'imposer la loi du carré aux fabricants de tôles.

M. Lorfeuvre indique, ensuite, les procédés techniques qu'il a employés et les résultats qu'il a obtenus dans la distribution de la puissance hydroélectrique aux coopératives agricoles. Il a cherché à réduire la main-d'œuvre au minimum en utilisant des usines hydrauliques d'appoint munies de génératrices asynchrones compensées et commandées à distance.

M. Roth a, enfin, présenté une note de M. Belfils sur la détermination du coefficient de surcharge, question pendante devant l'Union des Syndicats de l'Electricité.

La Section décide d'en remettre l'étude approfondie au moment où seront connus les résultats des essais entrepris chez les constructeurs et au Laboratoire central d'Electricité.

Ordre du jour des séances à venir

- a) Etude sur les pertes supplémentaires dans les machines électriques : M. Roth.
- b) Surtensions et moyens de les combattre.
- c) Coefficients de surcharge dans les machines électriques. .
- d) Isolants employés dans les machines. .

2^e SECTION. — *Eclairage électrique*

La 2^e Section s'est réunie le 15 mai 1923, sous la présidence de M. Lebaupin.

En ce qui concerne l'éclairage des écoles, elle a émis le vœu que les questions techniques soient étudiées au cours de réunions communes avec le Comité national français d'Eclairage.

Le cahier des charges concernant les lampes à incandescence à milieu gazeux sera vraisemblablement mis au point en juillet pour être transmis à l'Union des Syndicats de l'Electricité.

Les fabricants ont toutefois décidé de porter d'ores et déjà sur leurs catalogues de lampes :

La tension, la puissance consommée, le flux lumineux et, sous la rubrique : « *ancienne désignation* », l'intensité lumineuse.

La Section entend ensuite M. Risler sur les tubes dits à lumière froide. Ces appareils seront présentés à la Société en séance mensuelle.

Ordre du jour des séances à venir

- a) Nouveau modèle de Lumenmètre de M. Blondel.
- b) Eclairage des Ecoles.
- c) Cahier des charges pour la fourniture des lampes à atmosphère gazeuse.

3^e SECTION. — *Electrochimie, piles, accumulateurs*

Dans sa séance du 23 mai, sous la présidence de M. Bunet, la Section a entendu une causerie de M. Tribot-Laspière, sur le concours de traction par accumulateurs qu'organise, pour l'au-

tomme prochain, l'Union des Syndicats de l'Electricité, avec la collaboration du Ministère de la Guerre et de l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions.

Le programme de ce concours a rencontré l'assentiment unanime.

Ordre du jour des séances à venir

- a) Fusion de la silice au four électrique.
- b) Electrometallurgie du zinc.
- c) Etude générale des fours électriques.

4^e SECTION. — *Canalisations, Traction, Distribution générale*

Dans sa séance du 19 mai, la Section, sous la présidence de M. Parodi, a arrêté le programme de ses travaux.

Le champ de ses études étant particulièrement vaste, elle s'est divisée en trois Sous-Sections, présidées respectivement par MM. Périquier, Barillot et Darrieus, et qui s'occuperont des moteurs de traction, des canalisations et de la distribution générale.

Ordre du jour des séances à venir

1^o *Moteurs de Traction*

- a) Exposé du programme d'électrification des compagnies de chemins de fer.
- b) Description du matériel roulant et des systèmes de contrôle en cours de construction, pour les compagnies de chemins de fer et de tramways.
- c) Sous-stations automatiques.
- d) Echauffement des moteurs de tramways.
- e) Divers systèmes de traction sur route.

2^o *Canalisation*

- a) Fils et câbles ; échauffement et vieillissement des isolants.
- b) Pertes dans les diélectriques.
- c) Protection des réseaux.
- d) Lignes caténaires.

3° *Distribution générale*

- a) Théorie et mode d'emploi des abaques de Miss Clarke.
- b) Construction des lignes.
- c) Postes outdoor.

5° SECTION

Dans sa séance du 30 mai, la Section, sous la présidence effective de M. Bethenod, suppléant M. Langevin empêché, a mis au programme de ses travaux les questions suivantes :

1° *Télégraphie et Téléphonie*

- a) Méthodes d'essais des appareils téléphoniques : M. Valensi.
- b) Equilibrage des câbles téléphoniques à paires combinables : M. Valensi.
- c) Le champ magnétique et le champ électrique autour d'une ligne de transmission d'énergie par courants triphasés : M. Collet.
- d) La télégraphie aux fréquences harmoniques avec appareils imprimeurs rapides.
- e) Phénomènes observés sur les lignes pupinisées.
- f) Analyse des courants de conversation : Administration des Postes, Télégraphes et Téléphones.
- g) Perfectionnements récents à l'appareil Baudot.
- h) La télégraphie par le sol.

2° *Radiotélégraphie et Radiotéléphonie*

- a) Mesure du rayonnement des antennes : Commandant Mesny.
- b) Communications par ondes dirigées le long des lignes de mission.
- c) Modulation en téléphonie sans fil.
- d) Microphones associés aux relais amplificateurs.
- e) Téléphone hauts parleurs : M. Bethenod.
- f) Prises de terre, contrepoids, écrans.
- g) Liaisons entre réseaux téléphoniques et stations radiotéléphoniques.
- h) Télémécanique.

3° *Divers*

Application des ondes ultra sonores.

6^e SECTION. — *Recherches, instruments de mesure*

Dans sa séance du 12 mai 1923, présidée par M. Pérot, la Section a examiné l'intérêt que pourrait présenter la création d'une sous-section d'électro-physiologie.

Les membres présents sont arrivés à la conclusion qu'étant donné les organisations créées par le corps médical, les travaux de cette sous-section ne pourraient attirer un nombre suffisant de physiologistes, et il a été décidé que la 6^e Section limiterait ses travaux aux recherches scientifiques et aux instruments de mesure.

Ces deux ordres de travaux figureront alternativement à l'ordre du jour des séances mensuelles de la Section.

A la prochaine séance qui se tiendra le 9 juin, à 17 heures, 14, rue de Staël, M. Michel fera présenter une communication sur les instruments de mesure. (Cette communication sera faite par M. Iliovici sur les relais à maximum et protections différentielles.)

M. Maurain, directeur de l'Institut de Physique du Globe a présenté ensuite une communication sur la conductibilité électrique de l'atmosphère.

Il a rappelé que la méthode employée pour la mesurer est basée sur la rapidité de décharge d'un condensateur et signalé les nombreuses causes d'erreur qui ne permettent d'obtenir qu'une moyenne.

La conductibilité exprimée en unités électrostatiques est de l'ordre de $1,3 \times 10^{-1}$ à la surface du sol et augmente rapidement avec l'altitude pour atteindre probablement une valeur voisine de celle de l'eau acidulée à une centaine de kilomètres, altitude correspondant au maximum de luminosité des aurores boréales.

Elle est influencée par le voisinage de l'eau en mouvement (chutes d'eau ou ressac) et surtout par les phénomènes orageux.

On attribue la conductibilité atmosphérique à l'influence des radiations d'origine terrestre ou solaire.

M. Maurain a rappelé, en terminant, les tentatives d'utilisation de l'énergie électrique de l'atmosphère.

Le maximum de tension recueillie sur un cerf-volant à 5 000 mètres n'a pu dépasser 50 000 volts, en raison de la formation d'aigrettes ; l'intensité recueillie était extrêmement faible.

Dans sa séance du 9 juin 1923, tenue sous la présidence de M. Pérot, la Section a entendu la communication de M. Jouaust sur la loi de variation des pertes dans les tôles avec l'induction et celle de M. Iliovici sur les relais à maximum et les protections différentielles servant à protéger les réseaux contre les effets nuisibles des surintensités et des mises à la terre.

M. Iliovici présente les appareils que la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à Gaz, a récemment réalisés dans ce but.

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

NUMÉRO DU 15 MAI 1923 DE L'ELETTROTECNICA. — A propos du compte rendu de la réunion de l'automne dernier, où fut fêté le 25^e anniversaire de l'Association, le Secrétariat fait observer que, pour la première fois, cette réunion a été dans sa partie technique presque uniquement occupée par des discussions, ce qu'il regarde comme un très grand progrès sur les réunions précédentes.

Il ajoute qu'il s'est décidé à publier le compte rendu sténographique des discussions, corrigé par les auteurs, au lieu d'en donner un résumé coordonné, ce qui a l'inconvénient de laisser subsister des redites inévitables, mais a l'avantage de maintenir le caractère vivant de la discussion et aussi de simplifier la tâche des rédacteurs.

RÉUNION DU GROUPE DE MILAN DU 16 MARS 1923. — Suite de la discussion sur la continuité de la régularité dans l'exploitation des usines électriques.

RÉUNION DU GROUPE DE BOLOGNE 15 AVRIL 1923. — A la séance du matin, l'ingénieur Carnevali présente une communication sur 3 années d'exercice de la Société pour l'électricité dans l'agriculture.

La discussion, aussitôt entreprise, se poursuit à la séance de l'après-midi.

Le numéro du 6 juin de « l'Elettrotecnica » contient la communication signalée ici de M. l'ingénieur Giandotti, à la réunion de Bologne du 8 avril 1923, établissant un parallèle hydrologique entre les bassins de production et les bassins d'utilisation de l'énergie hydroélectrique appliquée à l'assèchement des terres.

Il rappelle la difficulté du problème qui consiste à faire face, suivant les variations atmosphériques, à des demandes d'énergie très irrégulières. Cette difficulté ne peut être résolue pour une station centrale qu'à la condition de pouvoir fournir l'énergie demandée en supplément à sa production normale. La solution n'est possible que si, à la précipitation de pluie, d'une durée et d'une intensité donnée qui rend nécessaire la mise en action des pompes dans le bassin d'assainissement, correspond une précipitation égale dans le bassin d'alimentation d'énergie.

Sauf bien entendu s'il peut être créé un réservoir de capacité suffisante.

L'auteur montre que la première de ces conditions est réalisée dans les bassins des Apennins.

Le même numéro reproduit la communication faite à la réunion de Bologne par l'ingénieur Cricca, sur « la conduite par moteurs électriques des postes de pompes d'assèchement » et celle de l'ingénieur Carnévali sur « Trois années d'exercice de la Société Electroagricole de Bologne ».

L'auteur donne des photographies intéressantes d'une cabine de transformation sur roues comprenant un transformateur à huile de rapport de transformation 15 000/220 volts 45/50 kilovolts-ampères ; d'un tracteur avec moteur de 40 à 50 ch, 220 volts ; d'un cabestan sur roues portant 1 500 m de câble d'acier ; d'une charrue funiculaire pouvant pénétrer en terrain sec jusqu'à la profondeur de 40 à 45 cm.

Il donne des consommations d'énergie électrique relevées pour divers travaux agricoles et une statistique des travaux exécutés, en progression très marquée, de 1920 à 1923.

Le numéro contient, outre le procès-verbal in-extenso de la session de Milan du 1^{er} au 8 octobre 1922 où fut discutée la communication de l'ingénieur Pfiffner sur les condensateurs Mosciski et sur la protection des réseaux contre les surtensions, le résumé des communications sur le fonctionnement en parallèle des usines génératrices, sur les poteaux en treillis et sur les poteaux en ciment armé.

La réunion annuelle se tiendra à Venise, en automne 1923 ; on y traitera des applications de l'énergie électrique.

ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Le Bulletin n° 1 de 1923 contient les statuts du Comité suisse de l'Eclairage (Comité national suisse de la Commission internationale de l'Eclairage). Le siège social de ce Comité est fixé à Zurich, au domicile de l'Association suisse des Electriciens, et le Bulletin de cette Association est aussi l'organe des publications du Comité national.

Le bulletin n° 1 contient, en outre, un procès-verbal détaillé de la 37^e Assemblée générale de l'Association suisse des Electriciens, tenue le 16 décembre 1922 à Olten et qui a adopté les règles pour la protection des conduites et des câbles souterrains, contre la

corrosion par courants vagabonds, ainsi que la série normale des tensions jusqu'à 220 000 volts.

M. Mariny a présenté une communication au sujet d'un condensateur pour la protection contre les surtensions.

Le Bulletin n° 2 contient le compte rendu de la 40^e Assemblée générale de l'Union des Centrales suisses d'Electricité, tenue à Olten le 16 décembre 1922.

Ce compte rendu rappelle que l'Union reçoit de ses adhérents des cotisations proportionnelles à leur capital et qu'elle verse directement des subventions au Bureau de Contrôle et Laboratoire de l'Association suisse des Electriciens.

Pour cette année, sous réserve de modifications dans l'avenir, ces subventions sont fixées comme suit :

Capital inférieur à 50 000 fr	40 fr
— de 50 000 à 250 000 fr	75 —
— de 250 000 à 1 000 000 fr	175 —
— de 1 000 000 à 5 000 000 fr	375 —
— supérieur à 5 000 000 fr	650 —

Le relèvement adopté sur le taux antérieur des cotisations augmentera les recettes de 7 500 fr.

Comme contrepartie, une subvention totale de 10 000 fr sera versée en 1923 aux Stations d'essai et d'étalonnement du Bureau de Contrôle.

Une discussion s'est ouverte sur l'utilité qu'il y aurait à modifier et, en cas de décassord, à dénoncer la convention liant l'Union des Centrales suisses d'Electricité avec l'Association suisse des Electriciens.

Le but de la proposition était de réserver à l'Union des Centrales l'étude des questions économiques, celle des questions techniques restant du domaine de l'Association suisse des Electriciens.

Par 73 voix contre 64, l'Assemblée décida d'étudier la révision de la convention, mais sans arriver à une dénonciation formelle.

UNIFICATION DES HAUTES TENSIONS. — L'Union des Centrales suisses d'Electricité déclare n'avoir rien à objecter à la série de tensions proposées par l'Association suisse des Electriciens : 110, 150, 220 kilovolts avec marge ± 10 0/0, mais elle réserve toute sa liberté pour le choix ultérieur des tensions à utiliser qui devront

répondre à des considérations techniques et économiques sur lesquelles on n'est pas complètement fixé.

Le bulletin n° 3 soumet aux observations des adhérents les projets de normalisations suivants :

Unification des hautes tensions. — Premier projet de l'Union des Centrales suisses d'Electricité.

Normes pour les essais des appareils à haute tension par rapport à la terre.

Tension d'essai $V = 2 E + 1\,000$ pour les appareils jusqu'à 10 000 volts ;

$V = 2,73E + 1\,000$ au delà de 10 000 volts si le neutre doit être mis directement à la terre ;

$V = 2E + 10\,000$ pour les isolateurs à sec ;

0,85 V sous pluie à 45° d'une intensité de 2,5 millimètres par minute. Durée 1 minute.

Normes de l'Association suisse des Electriciens pour l'essai des transformateurs au moyen d'ondes artificielles (appareils au-dessus de 3 000 volts). — Premier projet de la Commission mixte A. S. C. et V. G. S.

Tension de jaillissement de l'étincelle dans l'éclateur :

$$V = 1,3 E$$

Fréquence au moins égale à la fréquence normale.

L'étincelle de l'éclateur est soufflée par un courant d'air ayant une vitesse de 6 mètres par seconde.

Normes de l'Association suisse des Electriciens pour l'essai de transformateurs sous une tension surélevée (appareils de 1 à 1 000 kilovolts-ampères). — Premier projet de la Commission mixte.

$$V = 2 E$$

Durée 5 minutes.

Le bulletin n° 4 de 1923 donne des résultats d'essai de résistivité de conducteurs en cuivre exécutés par le Laboratoire de l'Association suisse des Electriciens pour le compte du service électrique de la ville de Bâle.

Les écarts relevés sur la résistivité normale (1,667 microhm-centimètre) ont atteint 150 pour 100 sur certains échantillons.

L'auteur de l'article conclut avec raison que la résistivité des conducteurs vaut la peine d'être vérifiée.

Le bulletin n° 5 contient un rapport sur l'activité et l'état financier des institutions de contrôle.

Ces institutions de contrôle ont un champ d'action fort étendu.

En 1922, l'inspection des installations à fort courant a porté sur 492 stations centrales, 989 particuliers, 497 installations.

Elle a exécuté 1 432 inspections et déposé 1 021 rapports.

La station d'essai des matériaux a exécuté 335 commandes portant sur 1 728 échantillons et essayé 4 454 lampes à incandescence.

La section d'étalonnement a reçu 1 368 commandes et étalonné 5 017 appareils divers.

Le total des recettes a atteint 432 390,90 fr.

Les dépenses se sont montées à 461 217,90 fr.

Toutefois, l'équilibre rompu par suite de la crise industrielle a été rétabli au cours du deuxième semestre grâce à une propagande intense pour de sévères mesures d'économie et à une réduction de personnel.

Notons que l'Association suisse des Electriciens se félicite d'avoir adopté le chiffre de 500 000 volts pour son installation à haute tension et qu'elle reçoit déjà des demandes pour des tensions supérieures.

ASSOCIATION ARGENTINE DE L'ELECTROTECHNIQUE

Le bulletin de février 1923 contient la nomenclature électrotechnique en espagnol, français et anglais, adoptée par la Commission électrotechnique internationale.

BIBLIOGRAPHIE

La houille blanche dans la petite industrie agricole et rurale, par MM. Pierre Guieu et Francis Babey. — Un vol. 18 cm × 13 cm, de VI-315 pages. — Paris, Garnier frères, 1922.

Sous un nombre réduit de pages (300 environ), cet ouvrage constitue une véritable petite encyclopédie des connaissances électromécaniques indispensables à toute personne utilisant la houille blanche comme source d'énergie et désirant posséder des idées générales sur les appareils producteurs, transformateurs et récepteurs de courant : travaux d'aménagement des chutes d'eau, roues, turbines, régulateurs, dynamos et alternateurs, moteurs à courant continu et alternatif, monographies de petites centrales hydroélectriques, applications particulières de l'électricité à l'agriculture et à la petite industrie.

Le dernier chapitre de cet intéressant ouvrage de vulgarisation est relatif à la législation des cours d'eau.

Calcul et spécification des machines dynamo-électriques, par Miles Walker. Traduction française par J. Keraly. — Un vol. 25 cm × 16 cm, relié toile, de 68 pages. — Paris, Ch. Béranger, 1922.

L'édition anglaise de l'ouvrage de M. Miles Walker est universellement connue et il faut savoir gré à M. Keraly de l'avoir mis, dans une excellente traduction, à la portée de tous les ingénieurs français.

L'ouvrage comprend une première partie, dans laquelle sont traitées les questions communes à toutes les machines électriques : le circuit magnétique, les enroulements, la ventilation et la prédétermination de l'échauffement ; dans une deuxième partie sont exposées des descriptions détaillées des alternateurs, des moteurs d'induction, des génératrices à courant continu, des commutatrices et des compensateurs de phase. Ce livre, d'un caractère essentiellement pratique, est dû à la plume d'un auteur qui fait profiter le monde industriel de sa longue expérience de constructeur.

A notre avis, il serait indiqué qu'une nouvelle édition fasse mention des constructeurs français, car cet ouvrage les ignore complètement, et ne tient compte, que dans une très faible mesure, des travaux des savants français. C'est ainsi que dans la longue bibliographie sur la marche en parallèle des alternateurs les études classiques de MM. Boucherot et Blondel ont été omises ; dans la théorie des deux réactions, il aurait été indiqué de citer le nom de M. Blondel et dans le chapitre sur les compensateurs ceux de MM. Leblanc et Latour ; enfin M. Bethenod a donné une construction qui permet de trouver directement l'angle de déphasage interne sans se livrer à de longs tâtonnements (page 322).

En mentionnant dans une deuxième édition les auteurs français, M. Keraly ne pourrait qu'augmenter la valeur de son travail, qui, à part ces remarques, mérite tous les éloges.

Manuel de l'apprenti et de l'amateur électricien. — 4^e partie : Traction électrique. 2^e édition revue et augmentée par Robert Marie. — Un vol. 18 cm × 13 cm, cartonné, de 163 pages. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Ce petit ouvrage, d'un caractère très élémentaire, consiste en majeure partie, et peut-être un peu trop exclusivement, en une monographie rapide des installations existantes de traction électrique les plus remarquables au point de vue historique ou, au contraire, par leur caractère d'actualité, suivie d'un exposé très sommaire des programmes actuels d'électrification.

En raison du cadre forcément étroit de ce manuel, on doit regretter que l'auteur ait cru devoir, d'une part, mentionner certaines données numériques qui, isolées, n'ont pas grande signification, d'autre part donner, sur certains phénomènes complexes, comme l'« effet de peau » ou les inductions parasites, des indications rudimentaires ou contestables, qui risquent d'induire en erreur le lecteur non prévenu.

Annuaire du Ministère des Travaux Publics. Année 1923.

Un vol. 21 cm × 13 cm de 880 pages. — Paris, A. Dumas, 1923

Cet annuaire officiel contient d'abord la liste complète des autorités successives qui ont dirigé en France les Travaux publics.

La liste s'ouvre donc par les noms du Duc de Sully et du Cardinal de Richelieu, pour se clore par celui de M. Le Trocquer.

On y trouve ensuite, classés par services, les noms des fonctionnaires de tous grades relevant du Ministère. Il permet de trouver facilement, dans le labyrinthe des bureaux, le personnage dont dépend souvent la solution d'une question importante.

L'ouvrage paraît donc constituer un instrument indispensable entre les mains de ceux qui, à un titre quelconque, ont à faire aux services publics.

Essai d'une étude sur les pertes par frottement dans les tuyères de turbines à gaz, par Willis Dhu Aine Peaslee, capitaine du Génie, armée américaine. — Une brochure 25 cm × 15 cm, de 19 pages. — Paris, Gauthier-Villars, 1919.

Bien que la turbine à gaz ne soit pas encore devenue d'application courante, il semble résulter de divers essais prolongés, entrepris pendant ces dernières années, qu'elle ne tardera pas à entrer dans le domaine de la pratique, au moins pour certains usages. Il suffit de se rappeler les débuts industriels longtemps hésitants de la turbine à vapeur, pour admettre de telles prévisions. A cet égard, le mémoire présenté par M. W.-D.-A. Peaslee à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, pour l'obtention du diplôme d'études supérieures, intéressera sans doute les spécialistes. D'un ensemble d'expériences répétées, il résulte que la perte de puissance due aux frottements dans les tuyères de turbines à gaz est au moins de l'ordre de 6 pour 100, c'est-à-dire comparable à celle observée avec les turbines à vapeur.

L'Electrodynamique des milieux isotropes en repos, d'après Helmholtz et Duhem, par Louis Roy, professeur de Mécanique rationnelle et appliquée à la Faculté des Sciences de Toulouse. — Un vol. 19 cm × 12 cm, de 94 pages (Collection « Scientia »). Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923.

Il existe en physique beaucoup de questions qu'on est porté à considérer comme parfaitement tranchées, de théories qu'on regarde comme parfaitement établies, alors qu'il n'en est rien. C'est précisément le cas pour les théories électriques de Maxwell.

Comme le rappelle M. Roy dans son introduction, H. Poincaré avait signalé toutes les contradictions qui se trouvent dans l'œuvre du grand physicien anglais. Ces contradictions n'avaient pas échappé non plus à l'esprit profond qu'était Duhem, et il avait cherché à maintes reprises à créer une électrodynamique dans laquelle, en partant d'hypothèses compatibles entre elles, on peut, sans jamais violer la logique, aboutir aux équations de Maxwell.

Il était parti de l'électrodynamique de Helmholtz et, moyennant une hypothèse qu'il avait appelée l'hypothèse de Faraday-Mosotti, il avait pu obtenir des équations semblables, mais non identiques à celles de Maxwell. Pour établir l'identité, il fallait annuler la constante de Helmholtz et Duhem n'avait pu trouver les raisons qui nécessitent qu'il en soit ainsi. M. Roy a pensé, avec juste raison, que les travaux de Duhem ne devaient pas être négligés. C'est leur exposition qui forme en quelque sorte le début de l'ouvrage. Mais, plus heureux que son devancier, l'auteur a pu démontrer que la constante de Helmholtz devait être nulle, et que, par suite, l'électrodynamique de Helmholtz et de Duhem conduisait d'une façon rigoureuse aux équations de Maxwell.

L'auteur termine par quelques considérations sur les unités électriques. On s'aperçoit en les lisant de l'utilité de la logique dans les sciences et on constate que certaines discussions récentes sur ce sujet n'auraient pas eu lieu si la rigueur n'avait pas parfois fait défaut dans l'établissement des théories qu'on nous enseigne. Cette simple remarque montre bien que M. Roy a fait œuvre utile en revenant sur des sujets trop délaissés aujourd'hui, et nous ne saurions trop recommander la lecture de son ouvrage à tous ceux qu'intéresse la physique théorique.

Radiotélégraphie, radiotéléphonie, radioconcert, par E. Raynaud-Bonin, ingénieur diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité, ingénieur des Postes et Télégraphes, professeur à l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes. — Un vol. 21 cm × 13 cm, de 178 pages (avec 88 figures). Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923.

Cet ouvrage est écrit pour les amateurs, mais il est écrit par un technicien, ce qui n'est malheureusement pas le cas de tous les ouvrages de cette sorte. Sous une forme très simple, M. Raynaud-Bonin a su rendre accessible à tous

les principes nécessaires pour comprendre le fonctionnement des appareils radio-télégraphiques. C'est la première partie de son ouvrage.

Dans la suite il donne de précieuses indications pour l'établissement des postes de réception destinés à l'écoute des transmissions radiotéléphoniques.

Des renseignements très intéressants sur les hauts-parleurs terminent cet ouvrage, qui devrait être le livre de chevet des amateurs sansfilistes.

L'Electricité industrielle mise à la portée de l'ouvrier, par A. Rosenberg. Adaptation française par A. Mauduit, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, 7^e édition, augmentée. — Un vol. 21 cm × 13 cm, de X-548 pages, avec 337 figures. Paris, Dunod, éditeur, 1923.

Dans la septième édition de ce manuel qui paraît aujourd'hui, l'auteur a ajouté en particulier les turbo-alternateurs et le démarrage en asynchrisme des moteurs synchrones ; le chapitre de la haute tension a été augmenté de la description des interrupteurs à huile. Un chapitre supplémentaire traite des redresseurs à vapeur de mercure.

La Soudure électrique. Soudure par résistance, soudure à l'arc, machines à souder, exemples de travaux, par M. Varinois. — Un vol. 28 cm × 19 cm, de VI-423 pages, avec figures. Paris, Dunod, 1923.

Ce livre comprend deux études distinctes : la soudure par résistance et la soudure à l'arc.

L'étude de la soudure par résistance est divisée en 8 chapitres relatifs aux principes théoriques et aux différentes méthodes de soudures en bout, par points, par percussion et continue.

Un chapitre est réservé à la rivure électrique, un autre aux machines à souder, enfin un dernier donne de nombreux exemples de soudure.

Cette première partie est claire, précise, complète.

L'étude de la soudure à l'arc comprend 4 chapitres relatifs aux principes et aux méthodes, ainsi qu'à l'étude des électrodes et des machines à souder et à l'exposé des applications.

Cette seconde partie donne, sous forme coordonnée, un exposé impartial des travaux faits jusqu'à présent sur le sujet, surtout en Amérique. Elle contient une grande quantité de gravures et de chiffres résumant les résultats d'essais effectués pour la plupart par des maisons américaines et le « Welding Research sub-Committee ». On y trouve des opinions contradictoires exposées sans aucun parti pris ; on pourra en tirer des conclusions profitables, surtout si la lecture est appuyée par l'expérience et des essais personnels.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

L'action des potentiels continus et l'influence de la température sur la résistance électrique de l'air, par J.-B. Whitehead et F.-W. Lee (Amer. Inst. Elect. Eng., mai 1921).

Les auteurs examinent brièvement la loi de formation de l'effet de couronne sur les fils ronds dans l'air, telle qu'elle résulte des observations faites au cours d'un certain nombre de recherches antérieures (travaux de Townsend, J. B. Baille, Whitehead, Peak, Brown, etc.), et ils décrivent une série d'expériences relatives à l'influence de la température sur la formation de l'effet de couronne par des potentiels continus. Les observations portèrent sur trois dimensions de fils : 0,0251 cm, 0,0803 cm et 0,0933 cm de diamètre et, dans chaque cas, les tensions de corona furent mesurées à des températures variant entre 5° et 70° C. Pour chaque température, on fit varier la pression dans des limites comprises entre la pression atmosphérique moyenne et 6,03 cm de mercure (cas extrêmes). Le haut potentiel continu fut emprunté à un tube redresseur à vide, ou « kénotron », en liaison avec un transformateur haute tension et des condensateurs. Il est donné une description complète du réglage et de la mesure du potentiel, de la température et de la pression. Pour l'échelle des valeurs considérées, la forme générale de la loi de corona, telle qu'elle a été développée expérimentalement par un certain nombre d'autres observateurs, se trouve satisfaite. La tension de surface critique à laquelle se forme la corona sur les fils ci-dessus mentionnés, peut être exprimée finalement par la relation :

$$E = 39,8 \delta + 10,36 \sqrt{\frac{\delta}{d}}, \text{ pour la corona positive,}$$

et

$$E = 40,3 \delta + 11,96 \sqrt{\frac{\delta}{d}}, \text{ pour la corona négative,}$$

relation dans laquelle δ est le facteur de densité de l'air, et d le diamètre du fil en centimètres.

Les courbes de corona positive et négative forment des familles de courbes distinctes lorsqu'elles sont observées à la même température et avec pression variable sur le même fil.

Les résultats des présentes recherches concordent avec la théorie de l'ionisation secondaire de Townsend.

Méthode industrielle pour déterminer les pertes dans le fer par A. Barbagelata (Elettrotecnica du 25 août 1921).

La méthode d'Epstein pour déterminer les pertes dans les plaques de tôle est devenue aussi pénible que dispendieuse, depuis la guerre, car les tôles, du moins en Italie, ne peuvent s'obtenir qu'en faibles quantités, ce qui nécessite une expérimentation continue. Et comme, au surplus, la méthode d'Epstein exige pour un seul essai 10 kg de tôles, qui doivent être découpées et assemblées, son emploi dans les conditions actuelles entraîne une grande perte de temps et d'argent.

L'auteur, sur la demande d'une firme industrielle, a étudié une méthode qui, dans sa forme définitive, n'exige que 0,25 m², soit 350 g de tôle. C'est une méthode de zéro un peu analogue à un pont de Wheatstone, et elle donne le montant des pertes d'un échantillon inconnu en fonction des pertes connues d'un échantillon servant de terme de comparaison, et en fonction d'un rapport de résistances. L'instrument employé pour apprécier l'équilibre est un électrodynamomètre à aiguille comportant une bobine mobile et deux bobines fixes. Deux connexions différentes et deux observations sont nécessaires pour déterminer les pertes dans un échantillon donné pour une induction donnée. Des photographies de l'appareil, tel qu'il est construit actuellement, accompagnent l'article.

Production moderne des isolateurs à suspension

par E.-H. Fritz et G.-I. Gilhrest (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1921).

Après un examen du progrès accompli, au cours des toutes dernières années dans la production de la « porcelaine électrique », les auteurs constatent que

la lenteur d'évolution de cette industrie, dans le passé, a été due au manque de coopération entre les céramistes et les électriciens. Dans une organisation moderne de manufacture de porcelaine, le contact est plus intime, surtout grâce aux laboratoires de recherches céramiques et électriques, qui essaient les nouveaux produits et surveillent la fabrication dans ses diverses phases.

Les auteurs mentionnent que les argiles actuellement employées en Amérique, renfermant une quantité considérable de lignite et de matière organique, se vitrifient à une température beaucoup plus basse que certaines argiles plus pures, mais si elles sont beaucoup plus compactes et se prêtent moins facilement à la fabrication des isolateurs de forme plus ou moins tourmentée, elles ont pour avantage d'aider le feldspath dans son œuvre de vitrification, avec moins de risques d'insuffisance ou d'excès de chauffage. L'argile anglaise a toujours satisfait à ces caractéristiques dans la plus grande mesure possible.

Les diverses phases de la fabrication sont décrites et fort bien illustrées par des photographies des machines en usage. De récents travaux de laboratoire ont montré la possibilité d'assurer, d'une manière parfaitement rationnelle, le traitement thermique des produits. Le gaz naturel, la houille et, plus récemment, l'huile, sont employés comme combustibles pour le chauffage ; c'est le gaz naturel qui se prête le mieux au réglage des températures des fours.

Le mémoire entre dans certains détails relatifs aux essais des isolateurs de fabrication courante, ainsi qu'aux essais des modèles, et il donne quelques chiffres concernant la résistance mécanique et la résistance à l'écrasement. En vue d'abaisser le coefficient de dilatation du ciment, on a essayé d'un mélange de porcelaine en poudre et de ciment, dans la proportion d'une partie de porcelaine pour trois parties de ciment : les résultats sont encourageants, et la question reste à l'étude.

A signaler, pour finir, des illustrations relatives à la distribution du champ électrostatique dans un isolateur Hewlett (à chaînons), et dans un isolateur à suspension à chape métallique.

L'erreur moyenne d'un compteur d'électricité

par G.-W. Stubbings (Inst. Elect. Eng., mars 1921)

Les questions touchant l'exactitude des compteurs d'électricité ont rapport à l'erreur d'enregistrement sur une période de temps, plutôt qu'à l'erreur de vitesse pour une valeur particulière de l'énergie en circuit. Il existe une certaine charge pour laquelle l'erreur de vitesse est la même que l'erreur d'enregistrement sur la période considérée, et le but de l'auteur est la recherche d'une méthode pour déterminer cette charge.

De l'examen des sources d'erreur inhérentes aux compteurs d'électricité, il résulte que, dans les compteurs où un couple de frottement constant est le seul facteur perturbateur, l'erreur d'enregistrement sur une période de temps est l'erreur de vitesse à la charge moyenne, sur cette période. Dans les compteurs qui présentent, en outre, un couple perturbateur proportionnel au carré de la vitesse, l'erreur sur une période sera légèrement plus faible que l'erreur à la vitesse moyenne. Une discussion de l'effet de la variation du facteur de puissance conduit à ce résultat, que l'erreur d'enregistrement, due à cette variation, est égale à l'erreur déterminée par un essai de vitesse à un facteur de puissance moyen, d'après les lectures d'un compteur d'énergie et d'un compteur intégrant la composante réactive de l'énergie en circuit.

Equivalence des deux théories du moteur d'induction monophasé

par V. Karapetoff (Amer. Inst. Elect. Eng., août 1921).

L'auteur considère, pour le moteur d'induction monophasé, deux diagrammes de circuits équivalents, qui dérivent, l'un de la théorie du champ tournant, l'autre de la théorie du champ transversal, et il prouve qu'ils sont mutuellement convertibles. Il démontre ensuite la possibilité d'autres diagrammes équivalents, et en développe un dans lequel le circuit du rotor est représenté par une impédance constante en parallèle avec une seconde impédance qui dépend du glissement, les deux impédances étant en série avec une réactance constante.

Le poids des pylones en fonction de la longueur de la portée

par C. Fascetti (Elettrotecnica du 5 août 1921).

Le but du présent article est de trouver une formule donnant immédiatement le poids des pylones en treillis à base rectangulaire, en fonction de la longueur

de la portée, et du nombre et du diamètre des conducteurs. Une telle formule serait très utile pour l'avant-projet des grandes lignes de transmission. La formule obtenue est :

$$P = 0,025 L (0,07 n d C + 50 L)$$

dans laquelle P représente le poids, en kilogrammes, de la partie du pylone hors de terre ; n , le nombre de conducteurs ; d , le diamètre des conducteurs en millimètres ; C , la longueur de la portée en mètres et L , la partie du pylone hors de terre. Les exemples donnés dans l'article montrent que le degré d'approximation de la formule est suffisant pour les besoins de la pratique.

Le magnétron, ou tube à vide à haute fréquence fonctionnant sous l'action d'un champ magnétique, par Albert W. Hull. (Amer. Inst. Elect. Eng., septembre 1921).

Le magnétron est un tube à vide du genre Kénotron, dont les éléments sont symétriques autour d'un axe. Il peut être constitué par un filament droit entouré par une anode cylindrique, ou par une anode droite en forme de tige entourée par un filament en hélice, ou encore, constituée par trois éléments, filament, grille et anode, tous symétriques autour d'un axe commun. De plus, il doit être d'une forme telle qu'un champ magnétique puisse y être appliqué commodément et économiquement. Cette condition est obtenue en faisant en sorte que l'enveloppe tubulaire en verre s'ajuste étroitement sur l'électrode extérieure cylindrique, de telle manière qu'une bobine de solénoïde puisse être enroulée directement sur le verre; de plus, l'anode est fendue longitudinalement, pour empêcher que le flux magnétique produit par le solénoïde ne soit neutralisé par les courants de Foucault. La fente de l'anode est d'une importance particulière quand des champs magnétiques alternatifs de haute fréquence doivent être appliqués. Au point de vue électrique, le magnétron est un tube à vide fonctionnant sous l'action d'un champ magnétique. Sa caractéristique peut être exposée comme il suit : Si une tension constante est appliquée entre la cathode et l'anode, le courant qui traverse le tube n'est pas affecté par un champ magnétique inférieur à une certaine valeur critique, mais il tombe à zéro si le champ est porté au delà de cette valeur. Les lignes du champ magnétique doivent être parallèles à l'axe du tube.

Des courbes de caractéristiques typiques sont communiquées par l'auteur, et la théorie du fonctionnement de l'appareil est discutée par analogie avec un moteur à courant continu marchant sans charge. Quant à la théorie mathématique du magnétron, on la trouvera dans « Physical Review » d'août 1921.

Actuellement, la seule application dont le magnétron soit réellement susceptible, est son emploi comme « détecteur synchrone » en radiotélégraphie par ondes entretenues, dans les stations réceptrices transocéaniques de la « Radio Corporation ». En ce cas, le magnétron agit comme un simple tube à vide de haute fréquence, ouvert et fermé au voisinage de la fréquence des signaux par un champ magnétique engendré localement, ce tube laissant pénétrer d'abord les pointes positives du signal, puis les pointes négatives, en donnant un son audible. Mais l'auteur entrevoit d'autres applications plus ou moins prochaines de cet appareil, par exemple comme parafoudre, comme redresseur, etc., etc.

IL Y A TRENTÉ ANS

Séance du 7 juin 1893. — M. Pellat présente le rapport de la Commission sur les propositions de l'American Institute en vue du Congrès de Chicago.

La Commission pense qu'il est extrêmement désirable de ne pas changer les décisions des précédents Congrès, à moins qu'il n'y ait eu contradiction ou erreur, car chaque Congrès est intéressé à respecter les décisions antérieures pour qu'on respecte les siennes.

Elle propose **entre autres** l'adoption du terme **réactance**.

Elle se résigne à accepter le terme **voltage**, mais elle s'élève contre sa généralisation à la place de **différence de potentiel**. Par application du principe énoncé au début, elle préfère maintenir **quadrant**, défini par le Congrès de 1889, plutôt qu'**henry**, terme nouvellement proposé.

Elle adopte **mho** proposé par Lord Kelvin.

Elle reconnaît l'utilité d'une unité pratique d'éclairement, mais hésite à appuyer le **bougie-mètre**.

Elle fait à l'adoption du **glibert** pour l'unité pratique de force magnétomotrice l'objection que cette unité est trop petite, et à celle du **gauss** et du **weber** pour les unités pratiques d'intensité de champ et de flux **magnétique** l'objection que ces unités sont trop grandes.

Elle craint que les calculateurs qui en feront usage ne se perdent dans les puissances de 10.

En ce qui concerne la modification de l'ohm légal proposée par le Comité de l'American Institute, elle remarque que la question est du domaine diplomatique, mais elle reconnaît que, dans une nouvelle définition, il conviendra de remplacer la définition de la section, dont la mesure est irréalisable, par l'indication de la masse de mercure. Elle est unanimement d'avis qu'il n'y a pas lieu de matérialiser l'ampère et le volt.

En effet, dit le rapporteur, si l'on définissait par l'électrolyse un étalon d'intensité, on obtiendrait avec moins d'exactitude l'intensité d'un courant en ampère étalon qu'en ampère vrai ; et aucun élément de pile ne conserve une force électromotrice constante au degré de précision avec lequel on peut obtenir cette force électromotrice en la comparant à la différence de potentiel déterminée par un courant connu passant dans une résistance connue.

La Commission écarte la création d'un étalon de bougie décimale fondé sur l'emploi d'une lampe à acétate d'amyle. Elle écarte, de même, la création d'un étalon de **conductibilité**.

Enfin, vu la diversité des langues, la Commission estime que les propositions concernant les notations et les symboles ne peuvent être utilement faites que devant le Congrès.

Ces conclusions de la Commission mises aux voix en séance de la Société, sont adoptées à l'unanimité. Elles seront présentées au Congrès de Chicago par MM. Mascart, Hospitalier et de la Touanne.

M. Violle fait une communication sur la lumière et la chaleur dans l'arc.

Il a constaté la constance rigoureuse de l'éclat du cratère, d'où il a conclu que le carbone était porté à l'ébullition.

Il a employé deux méthodes :

La **visée directe** au spectrophotomètre et la photographie.

La **fixité** des raies dans la première de ces méthodes, la constance de l'opacité de la **couche** impressionnée dans la seconde concordent pour démontrer la constance de l'éclat.

Il décrit ensuite la méthode calorimétrique qu'il a employée pour mesurer la température de l'arc. Il est arrivé à la valeur de 3 500° C. avec une certaine imprécision provenant de ce que la chaleur spécifique du carbone est encore mal connue.

Inauguration du Laboratoire Central dans les nouveaux locaux, 14, rue de Staël, le 14 juin 1893.

Le Bulletin de juin 1893 contient le compte rendu de cette cérémonie, à laquelle prirent part le ministre du Commerce et le président du Conseil municipal.

MM. Raymond, Président de la Société et Mascart, Président de la Commission du Laboratoire, rappelleront que le Laboratoire put être fondé grâce à l'existence d'un reliquat sur le fonds de garantie de l'Exposition de 1881.

Une souscription, dont le produit a atteint 100 000 francs a permis ensuite d'édifier les bâtiments sur le terrain que la ville de Paris a mis à la disposition de la Société pour une période de 60 années.

« Dans 60 ans, dit M. Mascart, nos successeurs ne manqueront pas de trouver auprès des Administrateurs de la Ville la même bienveillance : quant aux ressources, **elles viendront en temps utile : qui a donné donnera.** Le Laboratoire devient un centre d'études et d'instruction professionnelle, c'est dans cet ordre d'idées qu'il nous reste à faire un grand effort ».

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. HENRIOT - 30, RUE GENÈVE, PARIS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :

12 ET 14, RUE DE STAEL

PARIS (15^e)

LABORATOIRE :

12 ET 14, RUE DE STAEL

PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs. Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en France

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu
et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

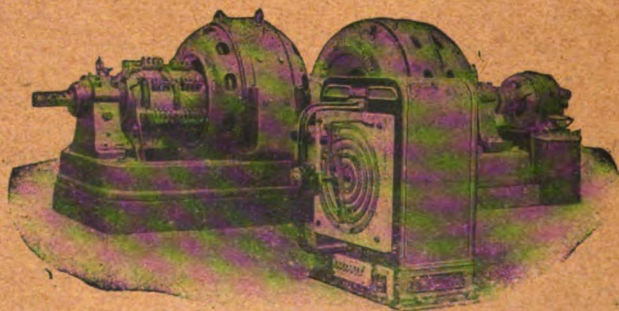
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 4 juillet 1923; Admission de membres titulaires, p. 281. — Membre décédé, p. 283. — Variation des pertes totales dans les tôles en fonction de l'induction (Travaux du Laboratoire central d'Electricité), (M. JOUAUST et Mlle BOURGOIGNON), p. 285. — Présentation de tubes fluorescents. Radiations excitant la fluorescence (Expériences), (M. RISLER), p. 293. — Utilisation de la puissance hydraulique dans les coopératives d'électricité (M. LORFEUVRE), p. 307.

INFORMATIONS, p. 319.

BIBLIOGRAPHIE, p. 331.

IL Y A TRENTE ANS, p. 332.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 4 juillet 1923 (1)

Présidence de M. P. ESCHWEGE

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Alliot (Maurice-Louis-Ernest), Ingénieur des Arts et Manufactures, associé de MM. R. Alliot, Rol et Cie, fabricants de fils et câbles pour l'électricité, 38, rue de Reuilly, à Paris (12°). — Présenté par MM. R. Alliot et J. Gros-selin.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Arlabosse** (Marcel), Ingénieur adjoint au Service radiotélégraphique de l'Indochine, 1, avenue Vauban, à Toulon (Var), pour la France, et à Saïgon : chef du Réseau radiotélégraphique de Cochinchine (Saïgon). — Présenté par M. le général Ferrié et M. P. Janet.
- Bitouzet** (Maurice), Ingénieur en chef de la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité à Paris, 26, rue Laffitte, à Paris (9°). — Présenté par MM. P. Eschwège et J. Grosselin.
- Brare** (Arsène-Jacques), Electricien dans un bureau d'études de haute tension, villa Trianon, à Villiers-sur-Marne (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. A. Blondel et C.-F. Guilbert.
- Costa de Beauregard** (Josselin), Ingénieur à la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité, à Paris, 27, quai d'Orsay, Paris (7°). — Présenté par MM. J. Bethenod et P. Eschwège.
- Courteaux** (Louis), Ingénieur en chef de la Société Oerlikon, 56, rue Blanche, à Paris (9°). — Présenté par MM. H. Coquet et J. Périquier.
- Danbon** (Marcel-Joseph-Auguste), Ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, 9, boulevard Carnot, à Belfort (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Roth et Belfils.
- Debout** (Albert), Administrateur délégué du Nord-Est Parisien et de la Fusion des Gaz, 4, rue Michel-Ange, à Paris (16°). — Présenté par MM. Eschwège et Girousse.
- Delebecque** (Henri), Inspecteur général de la Société Fusion des Gaz, 2, rue Victorien-Sardou, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Eschwège et Girousse.
- Devun** (Emile-Antoine-Marius), Directeur de la Compagnie électrique de la Loire et du Centre, 17, rue La Fontaine, à Paris (16°). — Présenté par MM. E. Brylinski et P. Eschwège.
- Duquesne** (Télesphore), Ingénieur à la Société Electricité et Gaz du Nord, 75, boulevard Haussmann, 6, rue La Motte-Picquet, à Paris (15°). — Présenté par MM. Ulrich et Perret.
- Feraud** (Lucien), Directeur de la Société du Nord-Est Parisien, 7, Cité Paradis, à Paris (10°). — Présenté par MM. P. Eschwège et Girousse.
- Fouan** (Charles-Marie-Joseph), Ingénieur diplômé de l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, élève à l'E. S. E., 78, rue de Rennes, à Paris (6°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Gounaud** (Fernand-Louis), Ingénieur à la Société d'Electricité de Paris, 18, rue de Belzunce, à Paris (10°). — Présenté par MM. Nicolini et P. Eschwège.
- Guerrin** (François-Henri-Marie-Pierre-Fernand), Ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort, 21, rue Scheurer-Kestner, à Belfort (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Roth et Belfils.
- Hautier** (Louis), Ingénieur, chef du Service des Installations électriques à la Compagnie du Gaz de Lyon, 24, rue Auguste-Comte, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Boutan et Maréchal.
- Iung** (Charles-Edouard), Administrateur délégué de la Société industrielle des Téléphones, 25, rue du Quatre-Septembre, à Paris (2°). — Présenté par MM. J. Grosselin et Marcel Meyer.
- Joubart** (Georges-Charles-Paul), Ingénieur, chef d'exploitation de la Société d'Electricité de Paris, 1, quai de Saint-Ouen, à Saint-Denis (Seine). — Présenté par MM. Nicolini et P. Eschwège.
- Lacau** (Charles-Edouard), Ingénieur au siège social de « Electricité et Gaz du Nord », 75, boulevard Haussmann, à Paris (8°). — Présenté par MM. Ulrich et J. Perret.
- Languepin** (Jacques-Emile), Industriel, Machines à souder électriques, 40, boulevard Auguste-Blanqui, à Paris (13°). — Présenté par MM. Boucherot et J.-F. Cellierier.
- De La Valette** (Henri-Jules-Adrien), Ingénieur civil des Mines, industriel, 70, avenue Kleber, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Eschwège et J. Grosselin.
- Lavanchy** (Charles), Ingénieur à la Société générale d'Entreprises, 36, boulevard de Verdun, à Courbevoie (Seine). — Présenté par MM. Ch. Duval et A. Blondel.

- Le Bars** (Alfred-Jean-Francis), Elève à l'E. S. E., Ergué-Armel, par Quimper (Finistère). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Leboucher** (Paul-Jules-Marie), Ingénieur en chef des Services techniques de la Compagnie des Chemins de fer du Midi, 19, rue Théodore-de-Banville, à Paris (17°). — Présenté par MM. H. Parodi et Dennery.
- Limasset** (Pierre-André), Ingénieur des Arts et Manufactures (1904), associé de R. Alliot, Rol et Cie, fabricants de fils et câbles électriques, 9, rue Chanzy, à Paris (1^{er}). — Présenté par MM. J. Grosselin et R. Alliot.
- Linke** (Charles), Installateur électricien, 10, rue de l'Arrivée, à Paris (15°). — Présenté par MM. J. Bethenod et Roth.
- Marchand** (Robert-Joseph), Ingénieur en chef du Service des transformateurs de la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Roth et Belfils.
- Mesny** (René-Marie), Professeur d'Hydrographie, 21, rue Jacob, à Paris (6°). — Présenté par MM. Pérot et Pomey.
- Montols** (Fernand-Léon), Ingénieur à la Compagnie d'Electricité de Paris, à Saint-Denis, 68, avenue Michelet, à Saint-Ouen (Seine). — Présenté par MM. Nicolini et P. Eschwège.
- Noblii** (Barthélemy-Ferdinand-Benoît), Elève à l'E. S. E., 8, square Théophile-Gautier, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Pinet** (Albert), Président du Conseil d'administration de la Société Fusion des Gaz et Administrateur délégué ; administrateur du Nord-Est Parisien, 42, rue de Paradis, à Paris (10°). — Présenté par MM. P. Eschwège et Girousse.
- Pinet** (Jean), Directeur général de la Société Fusion des Gaz, 68, rue Michel-Ange, à Paris (16°). — Présenté par MM. P. Eschwège et Girousse.
- Rambal** (Pierre), Ingénieur E. P. Z., Directeur général de la Société genevoise d'Instruments de physique, à Genève (Suisse). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Rouet** (Gustave-Marie-Louis-Joseph), Ingénieur en chef de la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Roth et Belfils.
- Rouillet** (Louis-Arthur), Industriel, Construction de filtres à air et d'appareillage électrique, 75, avenue Clemenceau, Le Vésinet (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. J. Bethenod et Roth.
- Rougeron** (Maurice-Etienne), Elève à l'E. S. E., 32, boulevard Pasteur, à Paris (5°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Tisserand** (Marcel-Charles), Ingénieur, sous-chef d'exploitation à la Société d'Electricité de Paris, 1, quai de Saint-Ouen (Seine). — Présenté par MM. Nicolini et P. Eschwège.
- Tribot-Laspière** (Jean), Ingénieur civil des Mines, secrétaire général de l'Union des Syndicats de l'Electricité, 25, boulevard Malesherbes, à Paris (8°). — Présenté par MM. P. Eschwège et J. Grosselin.
- Villem** (Raymond-Alfred-Henri), Ingénieur à la Société française Radio-Electrique (service des recherches), 32, rue Levert, à Paris (20°). — Présenté par MM. M. Latour et J. Bethenod.
- Wodey** (Paul-Henry), Ingénieur à la Société Alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort, 11, rue des Capucins, à Belfort (Haut-Rhin). — Présenté par MM. Belfils et Roth.
- Zambeaux** (Charles), Ingénieur des services électriques à la Compagnie du Gaz de Lyon, 26, rue Sully, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Boutan et Maréchal.
- Ecole d'Application de l'Artillerie**, à Fontainebleau (Seine-et-Marne). — Présentée par MM. P. Eschwège et J. Grosselin.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. LE PRÉSIDENT. — Nous apprenons la mort de *M. Hennard*, ancien administrateur-délégué de la Société des Forces motrices du

Rhône. Il était membre de notre Société depuis sa fondation. Nous faisons part à sa famille de tous les regrets que nous cause sa disparition.

M. LE PRÉSIDENT. — Je trouve sur mon bureau un livre de M. Barbillion, qui donne le compte-rendu du Congrès qui a été tenu à Marseille à l'occasion de l'Exposition coloniale en juin 1922.

Ce livre sera déposé à la bibliothèque de la Société, et j'adresse, en votre nom, nos remerciements à M. Barbillion pour cet envoi.

M. LE PRÉSIDENT. — Nous sommes informés que notre ancien Président, M. Mazen, vient de recevoir de l'American Institute of electrical Engineers, le titre de membre « Fellow ».

Ce titre n'est accordé qu'aux membres de l'Association qui se sont distingués comme ingénieurs ou comme professeurs, pendant au moins dix ans.

C'est parmi les membres « Fellow » seuls que peut être pris le Président.

D'ailleurs, sur les trente-deux membres français de l'American Institute of electrical Engineers, en dehors de deux membres d'honneur qui sont le maréchal Foch et M. Blondel, tous les autres ne sont que membres ordinaires ou associés. M. Mazen a été élu comme « Fellow » sur l'initiative des ingénieurs américains, en dehors de toute demande de sa part et après une enquête sérieuse auprès de six parrains.

Il y a là un honneur marqué rendu à notre éminent collègue et ancien président, et je suis sûr d'être votre interprète en adressant, à cette occasion, à M. Mazen nos plus cordiales félicitations.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

**RELATIONS EXISTANT ENTRE LES PERTES DANS LE FER ET L'INDUCTION
A LAQUELLE IL EST SOUMIS**

(Travaux du Laboratoire central d'Electricité)

M. Jouaust expose les résultats obtenus par Mlle Bourgoignon, au Laboratoire central d'Electricité, sur ces variations.

Il a été constaté que, pour certaines tôles, les pertes totales varient comme le carré de l'induction, et que pour d'autres la variation est beaucoup plus rapide.

M. JOUAUST. — « Nous avons été amenés à faire, au Laboratoire central d'Electricité, des expériences sur la loi reliant les pertes par hystérésis dans le fer à l'induction maximum à laquelle il est soumis. Nous avons pensé que les résultats auxquels nous sommes arrivés étaient susceptibles d'intéresser les constructeurs de machines et aussi les métallurgistes qui pourront peut-être y trouver quelques renseignements utiles pour l'amélioration de leurs produits.

» On dit généralement que les pertes par hystérésis dans le fer croissent comme la puissance 1,6 de l'induction et que les pertes hystérétiques, par centimètre cube et par cycle, peuvent être représentées par la formule :

$$W = \gamma B^{1,6}.$$

» Cette expression, connue sous le nom de loi de Steinmetz, s'est implantée dans l'électrotechnique et il est bien difficile de la déraciner.

» Il y a près de vingt ans, l'un de nous, utilisant les nombreux essais magnétiques exécutés au Laboratoire central d'Electricité, avait cherché à vérifier cette loi et était arrivé aux conclusions suivantes : Entre les inductions 4 000 et 15 000, les pertes par hystérésis, exprimées en ergs par cycle, sont représentées assez exactement par la relation :

$$W = \gamma B^2 :$$

autrement dit, la courbe représentant les logarithmes des pertes en fonction du logarithme de l'induction est une droite. La représentation était assez exacte, car on a pu constater dans de nombreuses mesures que, chaque fois qu'un point s'écartait notablement de la ligne droite, on se trouvait en présence d'une erreur d'expérience ou de calcul. Mais, dans bien des cas, le coefficient était différent de 1,6.

» On était même arrivé à la conclusion suivante :

» Pour toutes les tôles pour lesquelles, lorsqu'on cherchait à appliquer la formule de Steinmetz à l'induction 4 000, on trouvait pour γ une valeur supérieure à 0,002, le coefficient 1,6 convenait. Lorsqu'au contraire on trouvait pour γ une valeur inférieure à

0,002, le coefficient α prenait une valeur comprise entre 1,85 et 2.

» Ainsi les tôles semblaient se diviser en deux catégories : celles à fortes pertes, probablement les seules existant au moment des recherches de Steinmetz et les tôles à faibles pertes, c'est-à-dire les tôles dont les propriétés magnétiques ont été améliorées par des recuits convenables. Pour celles-là, les seules envisagées à l'heure actuelle, les pertes hystérétiques croissent comme la puissance 1,9 de l'induction.

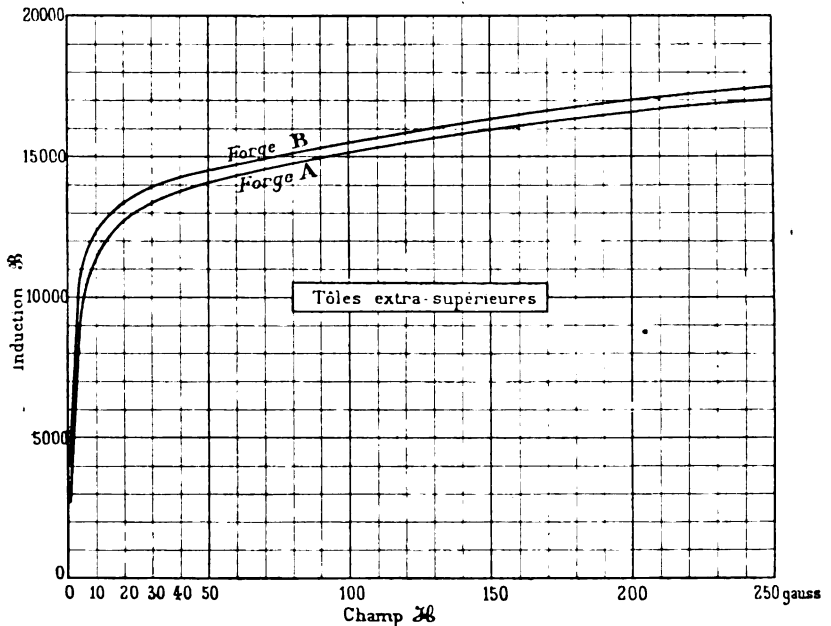


Fig. 1. — Courbes de l'induction en fonction du champ pour des tôles extra-supérieures de provenance A et B

» Au moment où fut faite l'étude dont nous parlons, les tôles au silicium n'existaient pas encore.

» Aujourd'hui, on ne sépare plus les pertes par hystérésis des pertes par courants de Foucault. Le procédé d'étude des tôles consiste à déterminer les pertes totales pour les inductions de 10 000 et de 14 000.

» Etant donné ce que nous avons dit, les pertes par hystérésis croissent à peu près comme le carré de l'induction ; les pertes par courants induits croissent comme le carré de l'induction. Nous avons donc pensé qu'un criterium de l'exactitude de nos mesures était le fait que les pertes trouvées pour l'induction 14 000 étaient égales aux pertes à l'induction 10 000 multipliées par $(1,4)^2$.

» Le tableau 1 montre qu'il n'en est pas toujours ainsi. Dans ce tableau on a représenté par x_t la valeur x dans l'expression $\left(\frac{14\,000}{10\,000}\right)^x$ par laquelle il faut multiplier les pertes totales à l'induction 10 000 pour obtenir celles correspondant à 14 000 gauss.

» Tandis que, pour certaines tôles, les pertes totales entre 10 000 et 14 000 croissaient bien comme le carré de l'induction, pour beaucoup d'autres, elles croissaient plus vite. S'agissait-il d'une erreur dans des mesures très délicates ? Dans ce cas, l'erreur eût été systématique, toutes les tôles se fussent écartées de la loi du

TABLEAU I

Marque de la tôle	Tôles extra supérieures		Tôles supérieures		Tôles ordinaires	
	x_t		x_t		x_t	
	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 1	Catégorie 2
A	2,06	—	—	2,13	1,94	—
B	2,06	—	2,01	—	1,80	—
C	2,06	—	1,97	—	2,09	—
D	2,1	—	2,03	—	—	2,28
E	2,06	—	2	—	—	2,12
F	2	—	2,09	—	—	2,21
G	2,04	—	—	2,92	—	2,38
H	—	2,30	—	2,21	—	2,18
I	—	2,45	2,01	—	—	2,49
J	—	2,22	1,85	—	—	2,55
K	2,03	—	—	2,20	—	2,31
L	2,06	—	1,97	—	2	—
M	2,06	—	—	2,38	2,06	—
N	2	—	2	—	2,06	—
O	2,01	—	1,97	—	2	—
P	2	—	2	—	2,01	—
Q	—	2,33	1,94	—	—	2,22
R	2,07	—	2,06	—	2,06	—
S	—	2,22	—	—	—	2,29
T	—	2,27	—	—	2,1	—
U	—	2,45	—	—	2,07	—
V	2	—	—	—	1,97	—

carré. De plus, quel genre d'erreur était à craindre ? Comme nous venons de le dire, les mesures des pertes totales sont très délicates. Pour les tôles extra supérieures, à forte teneur en silicium, les pertes sont très faibles. Les wattmètres utilisés fonctionnant avec des facteurs de puissance voisins de 0,1, la théorie montre que, dans ces conditions, ils doivent donner des indications trop grandes. On aurait pu penser que par cela même les pertes évaluées étaient aussi trop élevées, d'où l'anomalie constatée. Mais alors, celle-ci n'aurait pas dû se manifester dans les tôles ordinaires pour lesquelles les wattmètres se trouvent dans de bonnes conditions de fonctionnement.

» De plus, comme en bien des cas, il y a de grosses différences entre la théorie et la pratique, nous avons constaté que l'influence du déphasage sur les wattmètres dans la détermination des pertes totales était non pas de faire donner à ces appareils des indications un peu trop grandes, mais des indications beaucoup trop faibles.

» C'est ainsi qu'au cours des nombreuses études poursuivies au Laboratoire central d'Electricité à ce sujet, nous avons remarqué que tel wattmètre qui, essayé avec un facteur de puissance de 0,1

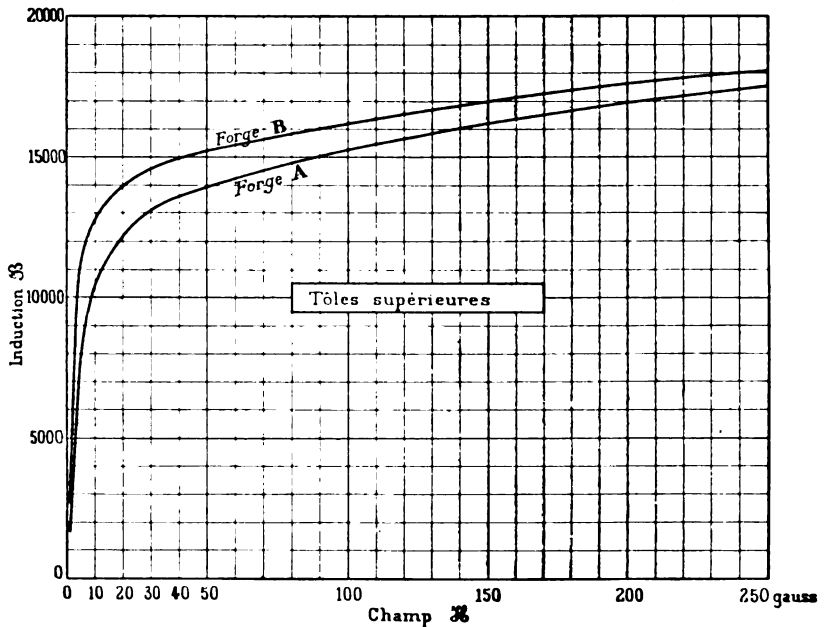


Fig. 2. — Courbes de l'induction en fonction du champ pour des tôles supérieures, de provenance A et B

avait une tendance à l'avance de 1 pour 100, retardait, au contraire, de 7 pour 100, lorsqu'on l'utilisait pour la mesure des pertes totales dans les tôles. La cause de cette anomalie est facile à expliquer. Le retard est dû à des actions de courants induits dans certaines pièces massives de l'appareil, actions qui dépendent de la fréquence et qui, par conséquent, sont beaucoup plus importantes lorsqu'on se trouve en présence d'un courant déformé, contenant de nombreux harmoniques comme c'est précisément le cas du courant magnétisant dans les enroulements des appareils servant à déterminer les pertes totales dans les tôles.

» Je n'insisterai pas sur les difficultés que nous avons rencontrées avant de mettre au point une méthode de mesure correcte

pour la détermination des pertes totales. Je crois pouvoir dire que nous sommes parvenus à les surmonter.

» Dans ces conditions, les résultats que nous avons mentionnés plus haut, semblaient bien indiquer que, dans certaines tôles, les pertes devaient croître beaucoup plus vite qu'on n'était porté à le croire.

» C'est ce qui nous a conduit à entreprendre l'étude dans nous allons vous entretenir.

TABLEAU II

Qualité de la tôle	B	Pertes totales en watts par kilogr.		Pertes par hystérésis en watts par kilogr.	Pertes par C-Foucault en watts par kilogr.	N_t	N_h	x_f
		$f = 25 \text{ p.s.}$	$f = 50 \text{ p.s.}$	$f = 50 \text{ p.s.}$	$f = 50 \text{ p.s.}$			
FORGE A								
Extra supérieure	10 000	0,71	1,62	1 3	0 32	2,45	2,55	2
	14 000	1,67	3 70	3 07	0 63			
Supérieure	10 000	1,0	2,20	1,75	0 45	2,94	3,14	2
	14 000	2,69	5,88	5 00	0,88			
Ordinaire	10 000	1,45	3,47	2,35	1,12	2,21	2,29	2
	14 000	3,16	7,28	5 08	2 20			
FORGE B								
Extra supérieure	10 000	0,65	1,19	1,14	0,35	2,33	2,45	2
	14 000	1,45	3,26	2,57	0,69			
Supérieure	10 000	0,92	2 18	1,50	0,68	2,09	2,12	2
	14 000	1,85	4,40	3,06	1,34			
Ordinaire	10 000	1,24	2 85	1,90	0,95	2,09	2,12	2
	14 000	2,40	5,75	3 87	1,88			

» Nous devons, tout d'abord, remercier les deux grandes forges françaises qui nous ont fourni les éprouvettes dont nous avions besoin.

» Les déterminations des pertes totales aux inductions 10 000 et 14 000 ont été exécutées au moyen de l'appareil Epstein modifié par Armagnat. La séparation des pertes a été faite par extrapolation en mesurant les pertes pour la même induction à diverses fréquences et en cherchant l'ordonnée à l'origine de la droite qu'on obtient en portant les fréquences en abscisses et en ordonnées, le quotient des pertes totales par la fréquence.

» Dans le tableau II ci-joint, x_h désigne l'exposant correspon-

dant à la variation des pertes par hystérésis et λ_f celui correspondant aux pertes par courants de Foucault.

» L'examen de ces résultats conduit d'abord à la remarque suivante.

» Les pertes par courants de Foucault croissent bien proportionnellement au carré de l'induction comme le veut la théorie. Cette concordance montre que l'on peut avoir confiance dans les expériences et dans les déductions qu'on en a tirées.

» Cette remarque n'était pas sans intérêt. La séparation des pertes totales en pertes par hystérésis et pertes par courants de

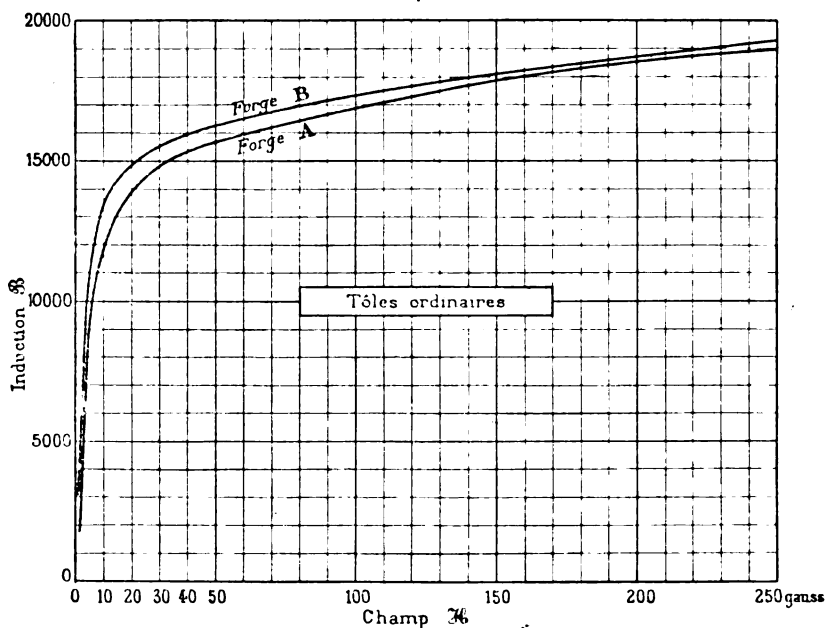


Fig. 3. — Courbes de l'induction en fonction du champ pour des tôles ordinaires de provenance A et B

Foucault, s'obtient par une extrapolation basée sur les mesures faites aux fréquences de 25 et 50 périodes par seconde. Étant donné la difficulté des mesures, on pouvait se montrer sceptique sur la valeur de cette extrapolation. Il était donc intéressant de mettre en évidence que, grâce aux précautions prises au cours des expériences, on a pu arriver à des résultats qui semblent présenter toutes les garanties d'exactitude.

» On voit, d'autre part, que, pour toutes les tôles de la firme A, les pertes totales entre 10 000 et 14 000 croissent beaucoup plus vite que le carré de l'induction, ceci étant dû aux pertes par hystérésis.

» Pour les tôles provenant de la forge B, au contraire, la loi

du carré de l'induction est sensiblement observée, du moins pour les tôles de qualités supérieure et ordinaire.

» Il était intéressant, dans ces conditions, de rechercher les différences que pouvaient présenter ces tôles en dehors de celles qui se manifestaient sur la variation des pertes totales.

» A cet effet, nous avons spécialement étudié leur constitution chimique et leur perméabilité.

» Pour le premier sujet de recherche, nous avons choisi les tôles supérieures qui, au point de vue des pertes, présentaient les dissemblances les plus grandes.

» Les analyses chimiques ont donné les résultats suivants :

TÔLES SUPÉRIEURES

	Forge A	Forge B
Carbone graphitique	0,26	—
Carbone combiné	0,10	0,10
Silicium	2,43	1,93
Manganèse	0,26	0,35
Phosphore	0,037	0,045
Soufre	0,012	0,011

» Le rôle du silicium est ici nettement mis en évidence, les tôles de la forge A ont des pertes par hystérésis plus élevées que celles de la forge B, mais, grâce à une proportion de silicium supérieure, les pertes par courants induits sont beaucoup moindres. C'est pour cela que les deux tôles à l'induction 10 000 gauss et à la fréquence 50 périodes par seconde sont équivalentes.

» Pour l'étude de la perméabilité, nous avons construit les courbes des figures 1, 2 et 3, correspondant aux différentes variétés de tôles.

» La détermination de ces perméabilités a été faite avec le perméamètre Ilievici au moyen d'éprouvettes prises dans les échantillons mêmes ayant servi aux déterminations des pertes totales.

» Ces éprouvettes étaient formées, par parties égales, de bandes découpées dans le sens du laminage et de bandes découpées dans le sens transversal.

» L'examen des courbes de perméabilité montre que les tôles de la firme A qui s'écartent notablement plus de la loi du carré que celles de la firme B sont très supérieures à celles-ci au point de vue de la perméabilité. Ce résultat semble indiquer que, pour les tôles de même qualité, il existe une relation étroite entre la perméabilité et les pertes. Les tôles les moins perméables sont celles dans lesquelles les pertes croissent le plus rapidement.

» Comment faut-il expliquer ces diverses anomalies qui ne semblent pas systématiques, car nous avons étudié des tôles de la forge A qui suivaient très exactement la loi du carré de l'induction.

» Y a-t-il là une question de composition chimique ? Faut-il voir là une action du carbone non combiné ?

» Ce sont autant de points d'interrogation que nous nous bornons à soumettre à l'attention des métallurgistes. Il y a une particularité toutefois qu'il importe de signaler. Les pertes par hystérésis que nous avons déterminées ne sont pas identiques à celles qu'on déduit de l'aire du cycle décrit par des procédés statiques.

» L'un de nous ⁽¹⁾ vous a déjà signalé que les pertes par hystérésis déduites par extrapolation des pertes totales étaient légèrement supérieures à celles déduites du cycle d'hystérésis statique.

» Nous ne pouvons que répéter ce que nous disions alors sur les phénomènes de viscosité magnétique étudiés jadis par l'un de nous ⁽²⁾, étude qui a, du reste, été reprise depuis peu à l'Institut de Physique de Strasbourg par Weiss et ses élèves.

» Est-ce dans ces phénomènes qu'il faut chercher la cause des anomalies constatées ?

» A vrai dire, rien n'est moins sûr. Dans un travail publié par Yensen ⁽³⁾ sur des aciers au silicium fondus dans le vide, nous trouvons des pertes par hystérésis, entre les inductions 10 000 et 15 000, qui varient comme la puissance 3,2 de l'induction et il s'agit là d'hystérésis statique.

» De nouvelles expériences semblent nécessaires pour arriver à éclaircir la question. Nous terminerons en déclarant que le personnel du Laboratoire central d'Electricité est prêt à accorder sa collaboration aux métallurgistes qui voudraient entreprendre des recherches sur ce sujet.

M. LE PRÉSIDENT. — Je remercie vivement M. Jouaust et j'adresse mes félicitations à Mlle Bourgoignon pour les intéressants travaux qu'elle a exécutés au Laboratoire central d'Electricité et qui présentent un intérêt immédiat pour nos fabricants de tôles.

⁽¹⁾ M. JOUAUST. *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, mai 1906, 2^e Série, t. VI, p. 219.

⁽²⁾ M. JOUAUST. *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, décembre 1904, 2^e Série, t. IV, p. 715.

⁽³⁾ M. YENSEN. *Proceedings of the American Institute of electrical Engineers*, octobre 1915, t. XXXIV, p. 2 455.

PRÉSENTATION DE TUBES FLUORESCENTS. RADIATIONS EXCITANT LA FLUORESCENCE

L'étude développée dans la communication ci-dessous a pour objet la production des phénomènes de fluorescence par différentes radiations provenant de mélanges de gaz raréfiés à une pression optimum.

Après avoir analysé succinctement les effets produits par les sources d'énergie aptes à l'apparition de ces phénomènes (rayons X, rayons cathodiques, vapeur de mercure, lampe à arc avec filtre au nickel, etc...), le conférencier a exposé ses recherches sur la décharge électrique par courant à haute fréquence à travers des tubes à gaz raréfiés et montré l'action de différents mélanges gazeux sur les écrans fluorescents. Il a montré en fonctionnement des tubes revêtus d'une pellicule de sulfure de zinc contenant différents phosphorogènes. Après avoir exposé les difficultés rencontrées au point de vue de la formation des tubes, l'auteur énumère les applications industrielles qui découlent de ses travaux : correction des tubes Moore à azote et des éclairages par néon-mercure et vapeur de mercure. Le principe de cette étude repose sur la loi de Stokes : transformation des radiations de courte longueur d'onde en radiations de grande longueur d'onde par la pellicule fluorescente. On obtient ainsi un éclairage de nuances variées, et qui permettra, sans doute, dans un avenir prochain, d'envisager la reconstitution de la lumière blanche par l'emploi des tubes à vide.

M. RISLER. — « Avant de commencer cette communication, je tiens à remercier le Comité de la Société française des Electriciens qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à mes recherches. J'adresserai un remerciement, en particulier, à M. Maurice Leblanc, qui a bien voulu nous mettre en rapport et me permettre ainsi d'attirer l'attention sur certains travaux intéressants les phénomènes de fluorescence, ainsi que sur les radiations favorables à leur production. Je n'ai pas l'intention de traiter entièrement ici ce sujet dont l'ampleur nécessiterait un développement considérable ; cependant, avant de vous faire part de l'orientation de mes récentes recherches, je crois qu'il est indispensable de définir, tout d'abord, quelques points de principe et de rappeler à votre mémoire les théories de la luminescence.

» I. GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMINESCENCE. — La fluorescence et la phosphorescence sont deux phénomènes qui relèvent de la luminescence... Wiedemann plaçait ainsi sous cette dénomination les corps émettant de la lumière et qui cependant ne se trouvaient pas portés à la température élevée correspondant à cette émission, il y aurait luminescence toutes les fois que le rayonnement émis par un corps n'est pas purement thermique.

» Ces phénomènes se divisent également en plusieurs catégories :

» 1° *La triboluminescence*, qui se produit lorsqu'on brise certains corps tels que le sucre, la craie, etc... et qu'on procède au clivage de leurs cristaux.

» 2° *La cristalloluminescence*, qui se manifeste dans certaines cristallisations tels que la solidification de l'argent.

» 3° *L'électroluminescence*, qui accompagne le passage de la décharge électrique.

» 4° *La chimicoluminescence*, phénomène très général ayant pour cause des réactions chimiques variées telles que l'oxydation du phosphore, la putréfaction du bois, de certains mollusques, poissons, etc..., dont le corps après la mort, se couvre de bactéries lumineuses.

» 5° *La thermoluminescence*, produite par une élévation de température qui, d'ailleurs, est insuffisante pour être la cause du rayonnement s'il était purement thermique.

» Il existe également dans l'organisme des substances fluorescentes capables de sensibiliser les tissus à l'action de la lumière, tels que les pigments biliaires et l'hématoporphyrine (substance intermédiaire entre le pigment sanguin et le pigment biliaire). De toutes façons, il a été constaté que ces substances fluorescentes de l'organisme transformaient l'action nocive de la région pénétrante du spectre de la lumière solaire.

» 6° *La photoluminescence*, dans laquelle le rayonnement lumineux est émis par le corps exposé lui-même à un rayonnement incident convenable.

» Pour ce dernier phénomène, deux cas particuliers se présentent :

» 1° Celui de la fluorescence dans lequel l'émission de lumière cesse avec l'excitation ;

» 2° Celui de la phosphorescence où l'émission de lumière se prolonge un certain temps après la fin de l'excitation.

» Citons en particulier, parmi les produits artificiels émettant cette double luminescence, les sulfures de calcium et de strontium. Ces phénomènes sont, en somme, très communs ; parmi les corps solides ou liquides qui jouissent de cette propriété, on peut indiquer : la fluorine, le verre d'urane, le pétrole, les solutions de sulfate de quinine, d'esculine, de fluorescéine, de rouge de Magdala, les sulfures alcalino-terreux. Parmi eux, beaucoup sont des mélanges, mais les corps dissous n'existent la plupart du temps qu'à l'état de traces.

» En effet, beaucoup de corps qui ne sont jamais phosphorescents sous l'influence de la lumière quand ils sont purs, acquiè-

rent cette propriété dès qu'on leur ajoute quelques millièmes de leur poids, c'est-à-dire des traces presque impondérables, de corps étrangers.

» Les sulfures alcalino-terreux et les minéraux naturels ne sont jamais phosphorescents à l'état de pureté, certains corps considérés comme très purs tels que la fluorine, l'apatite cristallisée, etc... sont cependant phosphorescents, mais ils contiennent toujours des traces de substances étrangères ; le diamant lui-même n'en est pas exempt. Ces corps étrangers susceptibles de donner la phosphorescence doivent être toujours en proportion très minime. M. Mourello a fait voir que, pour donner à du sulfure de strontium la propriété de devenir phosphorescent par la chaleur, il suffisait de le calciner avec dix millièmes de sel de manganèse ou de bismuth ; des observations semblables ont été faites pour les autres sulfures.

» De ce qui précède, il ressort donc que les phénomènes de phosphorescence seraient intimement liés à des combinaisons chimiques.

» En quoi consisteraient-elles ?

» Dans l'état actuel de la science et parmi tant d'autres inconnues, il n'est pas encore permis d'en fixer l'origine avec certitude. Certes, les explications ne font pas défaut, les physiciens émettent une hypothèse, les chimistes, une autre ; chacun veut ramener à sa propre discipline la théorie définitive. Soyons éclectiques, car les phénomènes de la Nature ne sont pas assez simples pour n'appartenir qu'à un seul domaine.

» II. RADIATIONS EXCITANT LA LUMINESCENCE. — *a) Bombardement cathodique.* — Etudions donc dès maintenant les différentes radiations, causes connues et occasionnelles de ces phénomènes ; rappelons à ce sujet, les expériences classiques du rubis devenant extrêmement lumineux sous l'influence du bombardement cathodique d'une ampoule de Crookes ; dans l'expérience qui suit, nous avons remplacé le rubis par des sulfures de zinc et de calcium.

» L'action des rayons cathodiques sur les substances fluorescentes est d'autant plus remarquable que la raréfaction supprime dans l'enceinte toute cause d'absorption. Les rayons cathodiques frappant sur leur passage les molécules du gaz raréfié, les ont dissociés en électrons et ions positifs, les uns et les autres ayant la

propriété d'exciter la vibration de la substance fluorescente. Remarquons que la présence d'un milieu à gaz raréfié paraît jouer un rôle considérable si l'on veut réaliser cette vibration par le phénomène cathodique.

» Dans le tube Coolidge, la surface interne de la paroi du verre acquiert une forte électrisation négative; contrairement à ce qui a lieu dans les tubes ordinaires où cette charge serait à chaque instant détruite par des ions positifs, la présence de cette charge négative empêcherait par action répulsive d'arriver jusqu'au verre des projectiles électroniques diffusés par l'anticathode.

» b) *Rayons X.* — Considérons maintenant l'action des rayons provenant d'un tube à rayons X quelconque : contrairement à ce qu'on pourrait croire, ces rayons d'une pénétration intense ne provoquent qu'une faible phosphorescence et seulement sur un petit nombre de corps. Sur les substances dites fluorescentes, c'est-à-dire dont la phosphorescence ne survit pas à la cause qui la produit, les rayons X agissent au contraire plus vivement se comportant bien alors comme les rayons ultra-violet. C'est ainsi qu'ils déterminent la luminescence des platinocyanure de baryum et de potassium, des tungstates, des phosphures et des sulfures de zinc.

» c) *Radiations visibles et invisibles de la lumière solaire ou artificielle.* — Continuant la série d'études des radiations excitant la fluorescence, nous abordons enfin les radiations visibles ou invisibles du spectre de la lumière solaire ou artificielle. Faisons passer rapidement une statuette enduite de sulfure de zinc sous les différents verres colorés interposés devant une lampe à arc : commençons par les radiations qui donnent à l'œil la plus grande activité visuelle, c'est-à-dire le jaune et le vert. Ces parties du spectre contiennent le maximum d'énergie des rayons visibles ; cependant, nous remarquons que, si leur action excitatrice est intéressante pour la production de la phosphorescence, elle est à peu près nulle au début de l'exposition, en ce qui concerne le phénomène de fluorescence. Il est vrai que ces verres colorés ne sont pas tous rigoureusement monochromatiques ; cette qualité, nous l'avons avec le verre rouge rubis.

» Sous cette radiation, vous voyez notre statuette rester terne et sans éclat. Ceci ne nous paraîtra pas étonnant si nous nous rappelons que les radiations rouges de grande longueur d'onde

ne possèdent qu'une faible activité chimique. Si nous faisons une incursion plus lointaine dans la partie de l'infra-rouge qui est caractérisée par l'intensité des phénomènes thermiques, il nous serait donné d'observer que cette région obscure du spectre n'est pas dénuée cependant de toute action sur la fluorescence.

» En effet, si nous retirions d'une boîte obscure, une statuette enduite de sulfure de calcium non phosphorescent, mais ayant été excitée il y a quelques jours, nous verrions progressivement naître une luminosité étrange. Cette luminescence saisissante persisterait aussi longtemps qu'il y aurait eu exposition à la source infra-rouge. L'intensité lumineuse est suffisante pour impressionner la plaque photographique.

» Une énergie purement calorifique nous aurait donné des résultats semblables, mais l'intensité après une progression rapide aurait diminué avec une moins grande célérité, jusqu'à l'extinction complète, sans que pour cela la source d'énergie calorifique ait été supprimée.

» Par contre, avec combien d'énergie verrons-nous se développer sous nos yeux les phénomènes de fluorescence dans la région violette et ultra-violette. Abandonnons les écrans de verres, opaques pour cette partie du spectre, et plaçons devant notre arc le verre de Wood à l'oxyde de nickel; aussitôt, sous ces radiations obscures, toutes nos substances deviennent intensément fluorescentes.

» Les radiations obscures de courte longueur d'onde sont transformées en radiations de grande longueur d'onde ; les radiations luminescentes ont ralenti, en effet, la fréquence vibratoire des radiations excitatrices et nous constatons, une fois de plus, un cas particulier de la grande loi générale de l'énergétique qui veut que toute transformation s'accompagne d'une perte d'énergie. Cependant la loi de Stokes que nous venons d'énoncer, ne doit pas être appliquée ici d'une manière trop rigoureuse ; les radiations luminescentes n'étant pas, comme on pourrait le croire, fonction directe de la vibration incidente ; les rayons luminescents sont en effet spécifiques de la substance et constituent un caractère atomique ; le même corps fluorescent nous donnera toujours le même spectre, et il est même curieux d'observer qu'étant donné un rayonnement incident provoquant la luminescence d'un corps, on puisse faire varier la nature et les qualités de ce rayonnement, sans pour cela modifier la qualité

des rayons luminescents émis. Les rayons X, les rayons du radium, les rayons bleus, les rayons violets produits par des sources d'énergie différentes pourront donner naissance à des phénomènes absolument identiques.

» Ici, nous croyons qu'il est nécessaire de donner notre opinion au sujet des explications relatives au mécanisme intime de la fluorescence ; l'absorption qui accompagne la fluorescence montre que ce phénomène dépend de la vibration de l'électron continuant à osciller après avoir été mis en mouvement ; cependant, il ne saurait être admissible qu'une vibration une fois engendrée, puisse continuer pendant un aussi grand nombre d'oscillations, sans recevoir d'énergie de quelque source ; nous serions donc en droit d'admettre que cette simple conception est insuffisante et qu'il existe au sein de la matière un processus chimique que nous ignorons. Disons donc qu'il paraît évident que la source excitatrice provoque d'abord l'émission de l'électron qui s'échappe en produisant l'effet photoélectrique, puis se recombine à l'intérieur du corps avec production de lumière. La résistance plus ou moins grande opposée à cette reconstitution de la substance serait l'origine des phénomènes de la fluorescence et de la phosphorescence. Cette hypothèse paraît la plus vraisemblable.

» Quelles sont maintenant les sources lumineuses les plus favorables à la production des phénomènes de fluorescence ?

» Ce sont évidemment celles qui seront composées de radiations excitatrices, à l'exclusion de celles qui paralysent l'action de fluorescence par leur antagonisme.

» D'autres solutions jouissent de la même propriété que la solution de sulfate de cuivre ammoniacal concentré, ce sont la liqueur de Schweitzer, la solution de bleu de méthylène ; d'autres, au contraire, ne laissent passer que l'extrémité infra-rouge du spectre : la solution d'iode dans le sulfure de carbone.

» Il faudra donc, si l'on recherche les phénomènes de fluorescence, placer les différentes solutions devant la source choisie en isolant les radiations favorables, ou se servir de corps transparents aux radiations actiniques visibles, et aussi aux radiations invisibles de l'ultra-violet, c'est-à-dire le quartz, le verre d'Iéna, le sel gemme, la fluorine, etc...

» Malheureusement, au point de vue pratique, on se heurte à des difficultés considérables. Voyons donc comment nous avons résolu la question.

» On se rappelle que, parmi ses travaux restés célèbres, Wiedemann signalait l'action des rayons de décharge produits par le courant électrique jaillissant entre deux électrodes dans un tube à gaz raréfiés ; il remarquait que, dans ce tube soumis à un courant rapidement alternant, les rayons jouissaient de la propriété de donner le pouvoir de thermoluminescence à certains produits chimiques, notamment au sulfate de calcium contenant une faible partie de sulfate de manganèse. Ces rayons sont émis sous des degrés de raréfaction plus faibles que ceux qui sont nécessaires pour produire les rayons cathodiques. Ils sont engendrés latéralement sur toutes les parties du trajet suivi par la décharge électrique, mais plus énergiquement vers la cathode. Leur production est favorisée par l'hydrogène et l'azote ; ceux qui se produisent par l'hydrogène sont partiellement transmis par le quartz et le spath fluor.

» Ce principe admis, si le but à atteindre est la production de la fluorescence, il est évident que nous devons chercher à combiner l'action de ces rayons de décharge avec l'action des radiations violettes et ultra-violettes provenant d'un mélange de gaz appropriés ; on peut utiliser, pour cet effet, le tube de Lyman constitué par la présence d'argon, d'oxygène, d'oxyde de carbone et d'anhydride carbonique.

» Le tube de Lyman que voici, laisse passer une grande partie de l'ultra-violet à travers la paroi du verre d'Iéna de très faible épaisseur dont il est formé ; ce tube permet d'étudier l'ultra-violet jusqu'à 1 030 angströms. Il fonctionne sous l'action d'un petit résonateur de haute fréquence. Nous constatons, cependant, que cette source d'ultra-violet relativement intense, ne possède qu'une action très faible sur la fluorescence.

» Sa luminosité est d'ailleurs médiocre. Cela ne doit pas nous étonner, car nous savons que les propriétés calorifiques et chimiques n'ont qu'une intensité correspondant à l'intensité lumineuse. Ces différentes propriétés calorifiques, lumineuses et chimiques, ne répondent pas, en effet, à trois sortes d'ondulations différentes, mais sont les modalités d'une même vibration.

» Aujourd'hui, il est démontré qu'une radiation donnée possède toujours à la fois des propriétés calorifiques et chimiques. Dans le spectre lumineux, les radiations vertes possèdent les trois qualités : lumineuses, chimiques et calorifiques. Notre œil la perçoit, la plaque photographique l'enregistre et elle agit sur le

bolomètre. Sa réfraction sur un second prisme ne peut lui retirer aucune de ces trois propriétés, inversement, son passage à travers une substance absorbante qui affaiblit le flux lumineux réduit dans le même rapport les propriétés calorifiques et chimiques.

» Si donc le tube de Lyman n'émet que des radiations faiblement lumineuses, son action sur la fluorescence restera de médiocre intensité. Il est donc nécessaire dans le but que nous voulons atteindre, de chercher à constituer un foyer lumineux plus intense, en même temps qu'actinique.

» A cet effet, nous avons eu l'idée d'utiliser les gaz rares comme l'argon et l'hélium et de les introduire dans un tube contenant déjà de l'azote purifié primitivement sur l'anhydride phosphorique ; voici l'un de ces tubes, nous remarquons que son action sur l'écran de sulfure de zinc, est relativement intense et qu'il agit même à une grande distance. Ce tube est en verre ordinaire « Radiox », son épaisseur empêche presque toute action de l'ultra-violet : Dans ce cas particulier de fluorescence que nous n'avons pu réaliser jusqu'à présent avec aucune source lumineuse, l'action actinique provient des radiations violettes et roses violacées du spectre visible.

» Si nous comparons cette action sur le même écran en utilisant dans le premier cas un tube à radiations visibles (argon, azote-hélium), et dans le second cas un tube à radiations obscures de notre composition, nous remarquons que l'action paraît sensiblement égale quand nous approchons les deux tubes à courte distance de l'écran. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si nous éloignons les sources excitatrices, notre tube « Radiox » agit d'une manière beaucoup plus énergique. Les rayons ultra-violets du tube obscur sont en effet absorbés par l'air avant d'avoir atteint l'écran qui est impressionné au contraire par les radiations de plus grande longueur d'onde de la source visible. Et nous constatons que la présence de l'azote dans le tube précité avait une heureuse influence sur la production des phénomènes que nous recherchons.

» Dans ces conditions, il venait naturellement à l'esprit d'utiliser l'ancien tube Moore comme producteur de fluorescence ; voici un tube vidé sur l'azote suivant le principe de Moore ; nous nous rappelons que cet éclairage fut utilisé il y a quelques années à cause de son excellent rendement pour la distinction des cou-

leurs, cette qualité spéciale le signalait pour être employé comme source d'éclairage dans les teintureries et dans les ateliers photographiques.

» Au point de vue de la fluorescence, l'action de cette radiation rose pâle nous paraît excessivement intéressante. Notons que cette action est encore due à la partie visible du spectre et que non seulement notre tube de verre ne laisse pas passer les radiations ultra-violettes, mais encore que l'azote qu'il contient les absorbe presque entièrement.

» Voici maintenant un tube vidé sur l'air sans aucune précaution ; ce tube qui n'a pas été chauffé, ni purgé sur le charbon et l'air liquide, contient naturellement tous les gaz de l'atmosphère et certainement aussi une assez grande quantité d'hydrogène qui se dégagera progressivement par suite de l'élévation de température due au passage de la décharge électrique ; transparent pour l'ultra-violet, l'hydrogène n'en paralysera pas l'action. Et nous constatons que malgré la phosphorescence pourpre extinctrice due à la présence de l'oxygène, l'action sur l'écran du sulfure de zinc est encore sensible.

» Nous venons de voir par cette analyse rapide qu'il était en somme facile de trouver des sources excitatrices ; malheureusement la difficulté devant laquelle nous nous trouvons en recherchant la production de fluorescence par ces différentes sources lumineuses réside dans l'instabilité même des phénomènes, qui sont étroitement liés au degré de pression intérieure du tube.

» Or, nous savons que plusieurs circonstances rendent cette pression particulièrement instable. Citons d'abord l'absorption et la libération des gaz à travers la paroi. S'il est parfaitement exact que les molécules de gaz heurtant violemment ses parois s'y incorporent et y demeurent, il n'en est pas moins exact qu'en aucun cas il ne peut y avoir saturation de ces parois et que réellement il y a libération des gaz dans l'atmosphère par exosmose. Ce phénomène peut être constaté sur des tubes dont on maintient la pression intérieure au moyen d'une soupape automatique. Nous savons également que l'absorption des molécules gazeuses ne se produit pas seulement par la paroi du verre, mais qu'elle a lieu aussi par les électrodes.

» Malgré tout le soin qu'on puisse apporter à la saturation et au purgeage, les phénomènes dont les électrodes sont le siège,

varient aussi souvent qu'il y a arrêt dans le passage du courant alimentant les tubes.

» Le tube commence-t-il à fonctionner ? Aussitôt il y a *absorption* de gaz durant la décharge.

» Le tube s'arrête-t-il ? Aussitôt il y a réémission de ce gaz à l'intérieur du tube dès que l'électrode se refroidit après l'arrêt.

» Ce phénomène d'absorption et d'émission de gaz dû à l'électrode permettrait, dans le cas d'un courant intermittent de faible puissance, de supprimer au moins pendant un certain temps l'emploi de la soupape de réadmission des gaz.

» Cependant, dans le cas d'un fonctionnement continu du tube fluorescent, il est nécessaire que la pression reste constante. En effet, si cette pression diminue, la fluorescence disparaît rapidement.

» Ce phénomène serait facile à constater dans un tube sur lequel on opérerait progressivement le vide, à l'aide d'une pompe moléculaire à haut rendement.

» La nature de l'électrode joue également un rôle dans la production de ces phénomènes. Suivant qu'elle émet tel ou tel gaz au moment de son échauffement ou de son refroidissement, l'absorption est plus ou moins rapide. Nous savons, en effet, qu'à une même pression, l'hydrogène est beaucoup moins absorbable que n'importe quel autre gaz et que les tubes contenant ce gaz ont une durée presque illimitée.

» Certains métaux employés comme électrodes ont, en outre, l'avantage d'être des sources appréciables de rayons ultra-violets. Citons, en particulier, le magnésium et le cadmium. En ce qui concerne la superficie des électrodes, elle n'intéresse notre étude qu'en raison de son rapport avec l'absorption subséquente.

» Ces différentes remarques ayant été exposées, nous allons parler maintenant de la formation du tube fluorescent. De ce qui précède, et par suite de ce que nous avons démontré, nous pouvons dire maintenant que notre tube se comportera exactement un transformateur de radiations.

» Nous savons que plus la longueur d'onde d'une radiation est courte, plus elle est facilement absorbée par l'air ; c'est ainsi que les radiations ultra-violettes utilisées dans la thérapeutique des dermatoses superficielles ne peuvent être appliquées au traitement des affections plus profondes, ce qui est d'ailleurs regrettable, car, étant donné leur action bactéricide intense, la méde-

cine se trouverait dotée d'une arme particulièrement puissante s'ils pouvaient, par ce moyen, atteindre les éléments microbiens internes.

» Pour utiliser la propriété fluorescente des radiations de courte longueur d'onde, il est donc nécessaire de placer la substance en contact direct avec ces radiations ; c'est ainsi que nous avons été amenés à étendre le sulfure de zinc à l'extérieur de notre tube : notons de suite qu'avant son broyage il peut être facilement incorporé à la pâte du verre et qu'il n'y aurait absolument aucun inconvénient à le préparer de cette façon. Ce qui importe avant tout, c'est que la pellicule de substances fluorescentes, soit étendue d'une façon aussi mince et uniforme que possible. Ses molécules doivent être juxtaposées, car, toujours, par suite du phénomène d'absorption, plus la masse de sulfure de zinc est épaisse moins elle est lumineuse. Dans ce cas, la première couche moléculaire vibrerait seule et aux dépens de celle qui lui serait superposée. La pellicule de vernis adhésif ferait encore écran absorbant si nous placions le sulfure à l'intérieur du tube ; de plus, par suite du dégagement continu de vapeurs diverses sous le passage du courant électrique, notre tube serait très difficile à vider et la pression intérieure ne pourrait rester constante.

» Nous allons étudier maintenant la stabilité du sulfure de zinc. Ce corps, par suite de la préparation qu'il subit actuellement, peut rester parfaitement stable au point de vue de sa constitution chimique si l'on prend quelques précautions essentielles.

» Il sera tout d'abord indiqué d'éviter le malaxage trop complet de la substance, il y aurait alors dissociation et perte absolue de la phosphorescence. Il est enfin nécessaire de protéger le sulfure contre l'influence des radiations de grande longueur d'onde dont l'effet destructif est particulièrement intense. Il est également indispensable d'empêcher le travail rapide d'oxydation qui s'accomplit à la surface de la substance au contact de l'air ; on devra donc la mélanger à un corps protecteur. Sous une épaisseur d'un millimètre, les vernis à base d'huile, de gomme dure ou le verre assureront une protection parfaite au sulfure phosphorescent et lui conserveront tout son pouvoir émissif, ainsi qu'il nous a été donné de le constater sur des tubes fonctionnant dans nos laboratoires et à l'extérieur.

» Dans le cas particulier qui nous intéresse, la nature du diluant offre très peu d'importance en ce qui concerne la fluo-

rescence. Il est évident qu'il devra être aussi transparent que possible, cependant, quel qu'il soit, s'il conserve toute garantie de stabilité, l'intensité lumineuse ne variera jamais sensiblement.

» Nous parlerons maintenant du courant de haute fréquence et de son efficacité indiscutable sur les phénomènes de fluorescence. Nous savons tous, depuis les expériences célèbres de Tesla, combien est sensible un mélange de gaz raréfiés dans un tube placé à proximité d'un résonateur de haute fréquence. Refaisons l'expérience que vous connaissez, en examinant cette fois la manière dont se comportera le sulfure de zinc dont est revêtu notre tube. (Nous pouvons agir également à distance).

» Cette utilisation sera d'autant plus intéressante que nous connaissons la qualité originale du courant de haute fréquence, lequel tend toujours à s'échapper à l'extérieur et se propage le long de la surface externe des conducteurs. Il se trouve, en l'occurrence, que cette surface externe est constituée par la pellicule de sulfure de zinc.

» Il est donc bon d'utiliser ici la combinaison haute-tension, haute-fréquence, car, s'il est vrai que notre intensité lumineuse croît en fonction de la tension, elle croît aussi en fonction de la fréquence. La fréquence que nous employons avec notre transformateur est de l'ordre de 1 000 000 périodes par seconde sous une tension de 60 000 volts. Ce dispositif nous a permis de réaliser ainsi une luminescence relativement intense si l'on veut bien considérer la faible consommation qu'elle nécessite.

» Le motif que vous allez voir fonctionner absorbe une puissance de 15 watts contrôlée officiellement, à l'aide d'un appareil Chauvin et Arnoux. La consommation est sensiblement la même pour un tube de 6 mètres de longueur et d'un diamètre correspondant.

» Il resterait maintenant à donner des chiffres en ce qui concerne l'intensité lumineuse en bougies ou le flux lumineux en lumens, afin de pouvoir comparer la consommation spécifique en watts par bougie décimale des sources actuelles, à celle d'un tube fluorescent. Mais vous savez combien il est difficile de photométrer d'une façon précise une source lumineuse colorée. Pour éviter des erreurs d'interprétation, nous avons demandé au Laboratoire central d'Electricité de bien vouloir consentir à ces épreuves, je crois qu'il n'y a pas d'inconvénient à citer ici la réponse de M. Janet :

« J'ai l'honneur de vous informer que nous pouvons faire facilement les déterminations de puissance consommée dans les tubes à vide dont nous avons parlé.

» La question de l'intensité lumineuse est plus délicate. Des études faites jadis au Laboratoire central d'Electricité sur le tube à néon ont montré que des opérateurs différents trouvaient, suivant la sensibilité de leur œil aux radiations émises, des nombres variant de 60 à 200.

» Dans ces conditions, vous comprendrez que nous ne pouvons vous donner la valeur absolue de l'intensité lumineuse de vos lampes. Cette valeur serait absolument vide de sens. »

» M. Blanc, professeur à la Faculté des Sciences, écrit d'autre part dans son ouvrage « Rayonnement et Eclairage » : « Parler de bougies, de lumens, etc..., pour une source colorée n'a pas de sens, tant que nous ne savons pas comparer avec la lumière émise par une source blanche celle d'une source colorée. » D'autre part, nous savons qu'il faut accepter sous toutes réserves les résultats obtenus avec les différentes méthodes de comparaison que l'on emploie aujourd'hui, quoique l'auteur précité déclare, sans plaisanter, qu'ils ne sont pas trop incohérents.

» Devant la divergence et la fragilité des valeurs réelles des chiffres de rendement actuellement admis, nous avons réservé notre étude photométrique et nous nous sommes contentés jusqu'à maintenant d'une idée approximative du rendement lumineux du tube fluorescent.

III. — EXPOSITION DE QUELQUES MOTIFS LUMINEUX. — « Si nous avons pu nous rendre compte de la gamme de nuances que permet le tube fluorescent, il nous apparaît que les sulfures à phosphorescence verte ou jaune nous donnent l'illusion de la lumière blanche, surtout si nous considérons cette lumière à une certaine distance. Nous pouvons, en effet, considérer la différence de nuance d'un sulfure soumis à l'excitation fluorescente et passant ensuite à l'état de phosphorescence rémanente qui succède à la fluorescence, cette phosphorescence reconstitue la couleur propre du sulfure employé. Dans cette vibration rapide de l'électron soumise à une radiation excitatrice favorable, il existe évidemment une manière artificielle d'arriver à la reconstitution de la lumière blanche ; c'est ainsi que nos tubes, examinés à distance et au dehors, constituent réellement des sources de blancheur

parfaite, en comparaison du système incandescent. A ce point de vue, le tube fluorescent formé suivant la manière que nous avons indiquée précédemment, pourra servir de correcteur aux sources lumineuses à radiations sélectionnées. Citons, en particulier, le tube Moore à azote qui, jouissant d'une action particulièrement efficace sur la fluorescence, ainsi que nous l'avons démontré, verra sa luminosité s'accroître d'une façon prodigieuse si on lui adjoint une pellicule fluorescente. Le tube néon-mercure pourra également bénéficier de cette combinaison. Ainsi que pour le tube Moore, dans ce cas particulier, avec la même source lumineuse, il sera possible de créer des éclairages décoratifs véritablement esthétiques et variés. La lampe à vapeur de mercure elle-même, dont l'emploi tend à se généraliser dans les laboratoires et les studios, pourra profiter, enfin, d'une correction de radiation que l'écran à la rhodamine n'est pas susceptible malgré tout de lui fournir. Pour ce cas spécial, il y aurait lieu, à notre avis, de choisir un tube opaque constitué suivant les procédés décrits précédemment : soit au nickel, soit au violet d'Hoffmann, à l'azotate d'argent, etc...

» Ce tube opaque ne laissant passer que les actions actiniques de l'ultra-violet, excitatrices des sulfures de zinc donneront naissance à une nouvelle forme de l'éclairage absolument inoffensive au point de vue de la rétine. Notre sulfure jouera, dans ce cas, le rôle de transformateur de lumière et de longueur d'onde et assurera ainsi l'innocuité parfaite de radiations primitivement dangereuses.

» Nous avons donc vu indépendamment de l'éclairage décoratif les nombreuses applications auquel notre système de fluorescence peut donner naissance. Nous y reviendrons d'ailleurs plus tard ; aujourd'hui nous tenons à vous remercier de la bienveillante attention que vous nous avez accordée et que nous avons soumis à une rude épreuve.

» Dans une prochaine communication, nous étudierons ensemble les différents spectres de fluorescence que nous avons obtenus et nous essaierons de démontrer, d'une manière plus précise, le rôle considérable que sont appelés à jouer les phénomènes de fluorescence dans la correction de l'éclairage par tubes à gaz raréfiés.

M. LE PRÉSIDENT remercie M. Risler.

**LES SYNDICATS RURAUX DE DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
ET L'UTILISATION DE PETITES PUISSANCES HYDROÉLECTRIQUES**

L'auteur indique les procédés techniques qu'il a employés et les résultats qu'il a obtenus dans la distribution de la puissance hydraulique aux coopératives agricoles.

En particulier, l'utilisation d'usines hydrauliques d'appoint et l'emploi de génératrices asynchrones lui ont permis une importante réduction des frais de main-d'œuvre.

M. LORFEUVRE. — « Le mouvement considérable qui se révèle actuellement dans la constitution des syndicats de communes pour la distribution d'énergie électrique et l'effort fait par les Pouvoirs publics et par notre représentation nationale à ce sujet, ouvrent à la discussion un certain nombre de problèmes.

» Les uns se rapportent aux frais de premier établissement et à la construction de réseaux ruraux et les autres à leur exploitation.

» Les problèmes de construction sont en très grande partie résolus par les subventions importantes, portant intérêt réduit, qui sont actuellement prévues par les lois de finances votées au Parlement et celles votées par les communes qui réduisent l'effort financier des concessionnaires.

» Le problème qui nous occupera plus particulièrement sera celui de l'exploitation et de la conduite industrielle des syndicats envisagés.

» Pour nous guider dans cet inconnu, nous pouvons nous baser sur les résultats d'exploitation d'un petit nombre de syndicats qui ont été mis en service depuis 2 ou 3 ans. Il faut avouer que ces résultats ne sont pas brillants et que l'on continue à vivre dans l'espoir de temps meilleurs et dans l'attente de l'augmentation du nombre des abonnés qui permettra à ces réseaux de vivre.

» Il est à noter que, dans les conditions actuelles, ces résultats peuvent être déterminés, sinon de façon rigoureuse, du moins avec une certaine précision, en examinant la nature des exploitations rurales envisagées.

» Les faibles coefficients d'exploitation sont obtenus dans les réseaux ruraux de petite culture, centres d'élevage ou culture de vignobles.

» Les coefficients élevés sont obtenus dans les pays de grande culture et sont variables en fonction du nombre d'hectares cultivés.

» Par contre, la construction des réseaux dans les pays de grande culture, dans lesquels les agglomérations et fermes sont

assez éloignées les unes des autres, nécessite des frais de premier établissement de construction des lignes d'un prix plus élevé.

» Les charges des exploitants sont considérables et les coefficients d'utilisation qui sont de 0,3 à 0,6 de l'énergie achetée, ont une répercussion immédiate sur le prix auquel les concessionnaires ou les syndicats exploitants sont amenés à vendre l'énergie.

» Nous trouverons dans la région de l'Aisne des exploitations dans lesquelles, pour permettre d'équilibrer le budget annuel, le

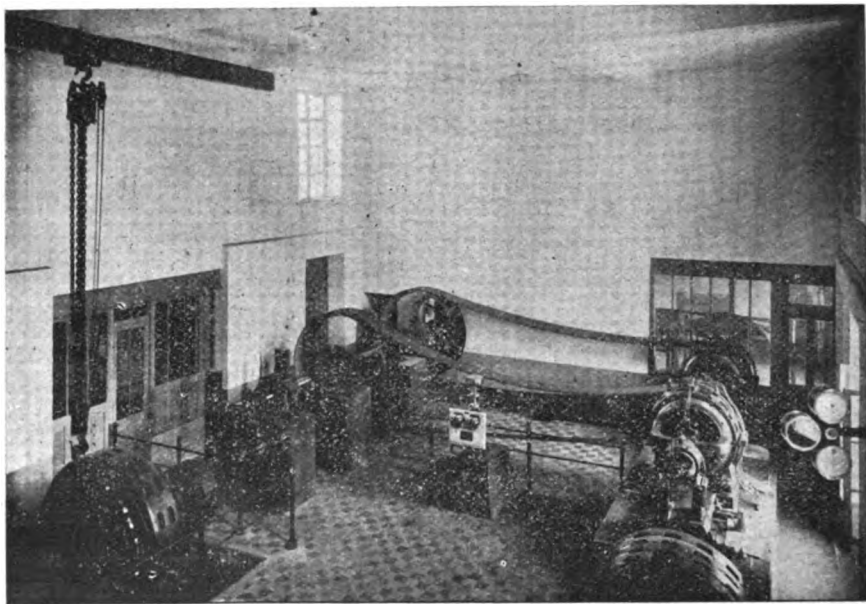


Fig. 1. — Usine hydraulique principale de 125 kilowatts.

courant de lumière sera vendu à un prix très sensiblement supérieur à 2,50 fr ou même 2,85 fr le kilowatt-heure, le prix de la force motrice s'établissant entre 1,30 fr et 1,90 fr le kilowatt-heure pour la petite force motrice. Ces prix de vente ne tiennent pas compte de l'avenir, les frais d'entretien de ligne étant très faible, en raison de la date de construction récente des réseaux.

» Ces prix véritablement très élevés auront un résultat immédiat qui sera d'éloigner l'agriculteur de l'utilisation de l'énergie électrique, car nul plus que l'agriculteur n'est habitué à calculer des prix de revient, et il ne sera possible de vendre l'énergie qu'à la condition que le prix de celle-ci soit accessible à tous.

» De l'ensemble de ce problème, d'apparence insoluble et qui

doit attirer particulièrement notre attention, le facteur de dépense le plus élevé est évidemment l'achat de l'énergie à haute tension, destinée à faire face aux pertes à vide des transformateurs.

» A ce sujet, il vient d'abord à l'idée de réduire la puissance de ces transformateurs, mais l'on est immédiatement arrêté dans cette voie par la nécessité d'installer des puissances qui permettront, à toutes époques de l'année, et plus particulièrement dans la période qui s'étend depuis fin juillet jusqu'au milieu de décembre, de faire face aux puissances demandées par le battage mécanique.

» Les tendances dans cette direction, en raison de la diminution considérable de main-d'œuvre vont vers des puissances unitaires de plus en plus élevées, qu'il y aura lieu de chercher à limiter. Quoi qu'il en soit, les très grosses batteuses actuellement en service, absorbent normalement 20 kilowatts avec des pointes qui peuvent aller jusqu'à 30 et même 35 kilowatts. Etant donné que ce matériel, lorsqu'il fonctionne, exige cette puissance pendant un minimum de 10 heures consécutives, il sera donc nécessaire de prévoir les transformateurs en conséquence.

» Malgré tous les efforts faits par les constructeurs pour réduire les pertes à vide, il faudra tenir compte que les transformateurs de ces réseaux seront en pleine charge pendant une durée de 300 heures par an, par tranches de 10 heures sur les 8 700 heures dont se compose l'année, ce qui explique les dépenses considérables à vide des réseaux envisagés.

» La puissance ainsi absorbée par les pertes à vide représente une puissance instantanée faible par rapport à la puissance instantanée maximum qui s'étend sur l'année entière, car il est difficile d'avoir une organisation permettant la substitution des petits transformateurs aux transformateurs normaux pendant la plus grande partie de l'année et l'organisation d'un service ou d'un matériel automatique permettant cette substitution représente des immobilisations supplémentaires très élevées.

» J'ai été amené, il y a déjà deux ans, avec le concours des Etablissements Devilaine et Rougé, à reprendre l'administration d'une affaire de distribution dans le département de l'Aisne qui se trouve en plein centre de grande culture. Le matériel dont cette société dispose comportait :

» Une station centrale hydraulique de 125 kw et 2 petites sta-

tions de chacune 30 kw. Une unité à vapeur de secours de 300 kw.

» La première idée qui m'est venue en examinant la situation, c'est que nous serions dans l'obligation d'arrêter les deux petites centrales, la quantité d'énergie produite par ces deux usines représentant une valeur insuffisante pour couvrir les frais d'exploitation nécessités par le maintien du personnel nécessaire à leur surveillance.

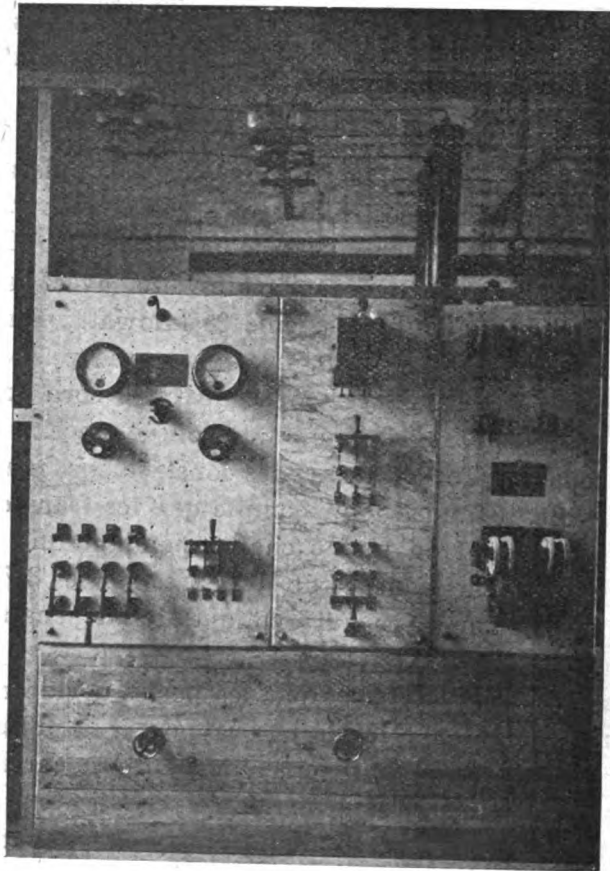


Fig. 2. — Tableau de la station auxiliaire de 25 kilowatts.

» J'ai été amené à étudier la possibilité de réaliser la commande à distance automatique de ces usines, et d'envisager ainsi la suppression de tout le personnel de conduite, les petits entretiens journaliers du matériel se trouvant être une obligation de l'agent logé dans les dépendances du moulin.

» La méthode qui a été employée consiste à assurer cette exploitation à l'aide de génératrices asynchrones.

» A ce sujet, les travaux faits par votre ancien président, M. Maurice Leblanc, dans la période qui s'étend de 1898 à 1903, m'ont été d'un secours précieux, et il est remarquable que M. Maurice Leblanc avec son habituelle vision de l'avenir, a trouvé là une utilisation du moteur asynchrone qui peut être assez importante.

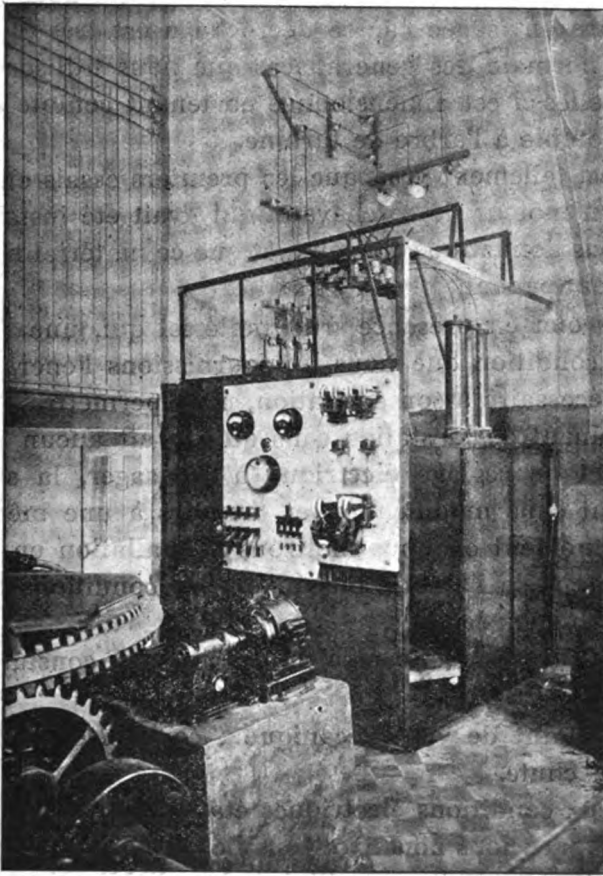


Fig. 3. — Station auxiliaire de 35 kilowatts

» Je ne ferai pas ici la théorie de ce matériel, et je me contenterai d'en étudier les résultats d'exploitation.

» Nous savons tous qu'un moteur asynchrone attelé sur un matériel pouvant être moteur à certains moments, se mettra à débiter de l'énergie à partir de sa vitesse de synchronisme, au fur et à mesure de l'augmentation de vitesse pour atteindre sa pleine charge à une vitesse d'environ 2 à 5 pour 100, supérieure à celle correspondante au synchronisme.

» La limite de vitesse est déterminée par l'équilibre du couple résistant de la génératrice sur le couple moteur de la turbine, sauf dans le cas où une disproportion considérable entre ceux-ci permettra le décrochage de la génératrice, comme d'ailleurs cela se produirait pour le moteur asynchrone correspondant.

» Cette dernière éventualité, dans les cas qui nous intéressent, ne peut être envisagée car ce décrochage est très éloigné de la puissance normale des génératrices que nous utilisons. La puissance de celles-ci est dimensionnée en tenant compte de la puissance disponible à l'arbre de turbine.

» Ceci est tellement vrai, que les premiers essais ont été réalisés avec un moteur de 25 chevaux qui avait été installé sur une turbine nous donnant 35 chevaux, et que ce matériel a fonctionné sans accident pendant plus d'un an.

» Nous voici en présence d'un matériel qui, une fois mis en service, à condition que nous lui fournissions l'énergie réactive qui sera nécessaire à son excitation, nous permettra d'assurer le fonctionnement de la station sans qu'il y ait aucun maniement de matériel de réglage électrique à envisager, la situation se prolongeant sans modification et toujours à une même charge, depuis le moment où nous mettrons l'installation en route, jusqu'au moment de l'arrêt, pourvu que les conditions extérieures suivantes soient réalisées.

» 1° Au point de vue électrique : tension constante et fréquence constante ;

» 2° Au point de vue mécanique : constance de la hauteur nette de la chute.

» Les deux conditions électriques étant obtenues à l'usine centrale électrique, nous nous trouvons donc pour assurer l'automatisme de cette installation auxiliaire, dans l'obligation de réaliser le problème suivant :

» Mise en route de la turbine à distance, accrochage de la génératrice asynchrone au moment où nous passons au synchronisme, lecture à distance des constantes de l'usine auxiliaire.

» Je me suis servi pour réaliser ce dernier problème de deux fils téléphoniques de l'ancienne installation, tout en maintenant la possibilité de me servir normalement du téléphone.

» La commande à distance de mise en route est faite à l'aide de courant continu fourni par la station centrale qui sera envoyé

dans un relais, qui mettra en route un contacteur commandant le servomoteur du distributeur de la turbine. L'ensemble de ce dispositif est représenté par la figure 4.

» En agissant sur ce relais, nous assurerons donc le démarrage de la turbine, lorsque cette turbine approchera de la vitesse de synchronisme, un régulateur centrifuge commandant un contacteur spécial se substituera à l'action du relais pour continuer à ouvrir la turbine.

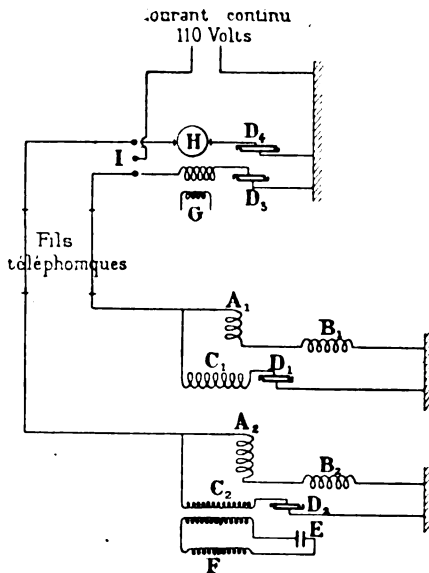


Fig. 4. — Schéma de montage du matériel de mesure et commande à distance : A₁, A₂, relais à courant continu 110 volts avant et arrière ; B₁, B₂, self-inductances ; C₁, transformateur d'intensité, génératrice ; C₂, transformateur d'intensité du niveau d'eau ; D₁, D₂, D₃, D₄, condensateurs ; E, lames plongeantes du niveau d'eau ; F, transformateur de puissance d'isolement du circuit hydraulique ; G, wattmètre ; H, ampèremètre ; I, inverseur à courant continu.

» Ce contacteur cessera son effet sur le servomoteur dès que la vitesse de la turbine sera de 5 pour 100 inférieure à celle du synchronisme, la turbine continuera son accélération et, au moment précis où le synchronisme sera atteint, un contacteur plus important assurera l'accrochage de la génératrice asynchrone ; à partir de ce moment, celle-ci se mettra en charge progressive sur la turbine, pour fonctionner à la puissance de régime normal lorsque le couple moteur de la turbine sera équilibré par le couple résistant de la génératrice.

» Pour assurer l'arrêt de la machine, nous aurons à faire simplement la manœuvre qui fermera l'admission d'eau de la tur-

bine. Lorsque l'abaissement de vitesse ainsi produite repassera par la vitesse de synchronisme, notre génératrice asynchrone sera automatiquement déconnectée.

» Il peut arriver pendant la période de marche que la quantité d'eau arrivant dans le bief soit insuffisante pour maintenir le niveau en amont de la turbine. Cet incident de fonctionnement aurait pour résultat de diminuer la puissance disponible sur l'arbre de la turbine par diminution de vitesse, et lorsque nous aurons atteint la vitesse de synchronisme, immédiatement la génératrice se décrocherait.

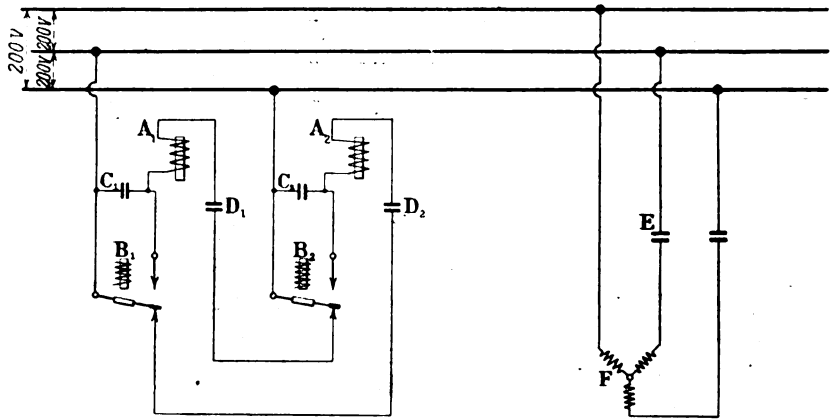


Fig. 5. — Montage de la station auxiliaire : A_1 , électroaimant du contacteur d'ouverture des vannes ; A_2 , électroaimant du contacteur de fermeture des vannes ; B_1 , relais à courant continu, marche ; B_2 , relais à courant continu, arrêt ; C_1 , contact régulateur, marche avant ; C_2 , contact régulateur, marche arrière ; D_1 , interrupteur fin de course, marche avant ; D_2 , interrupteur fin de course, marche arrière ; E , contacteur génératrice ; F , génératrice asynchrone.

» Il est donc nécessaire que nous puissions à l'usine principale contrôler, à la fois, la puissance d'utilisation et le niveau d'eau dans le bief.

» L'opération a été réalisée en utilisant les deux fils pilotes pour servir par des dispositifs spéciaux à transmettre : 1° l'indication de la puissance débitée à la station auxiliaire au moyen d'un wattmètre dont l'excitation est prise à l'usine ; 2° l'indication du niveau d'eau dans le bief de la station auxiliaire au moyen d'un ampèremètre dont les indications sont proportionnelles à la hauteur plongeante de deux lames de cuivre. Ce dispositif ainsi réalisé, présente toute sécurité de fonctionnement, étant donné sa très grande simplicité et donne une approximation suffisante.

» Comme conséquence de fonctionnement, dans le cas où l'électricien de service constate une modification du niveau dans le bief de la petite usine qu'il commande, il peut, par les touches successives sur son contacteur, assurer une fermeture ou une ouverture progressive du distributeur de la turbine et, de ce fait, une variation correspondante de la puissance produite.

» Dans le cas où la quantité d'eau, malgré ce travail, deviendrait insuffisante, il aurait la dernière ressource d'arrêter la petite usine, quitte à la remettre en service dès que le plan d'eau serait revenu à son étage normal.

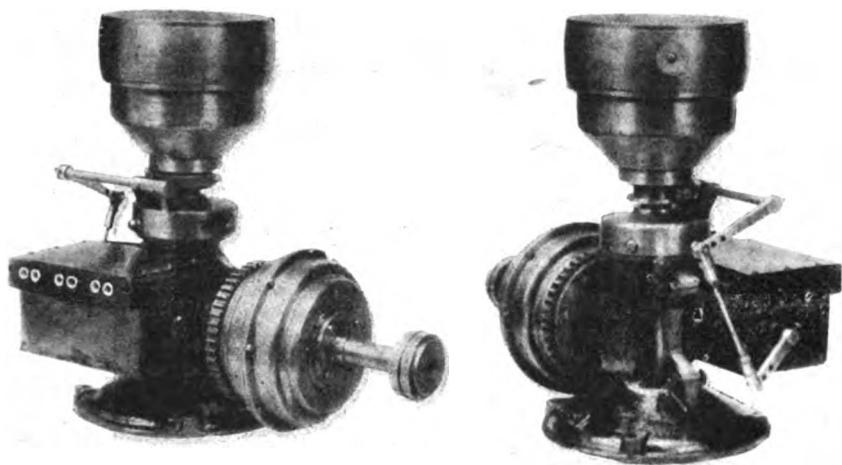


Fig. 6. — Vues du régulateur montrant le combinateur et le tambour-frein d'accouplement contenant le frein limiteur

» Diverses observations se présentent immédiatement à l'esprit au sujet de la réalisation des procédés indiqués ci-dessus.

» 1° Dans le cas d'arrêt dans la production de l'énergie à la station génératrice, les génératrices asynchrones n'étant plus excitées et, d'autre part, les servomoteurs n'étant plus alimentés en énergie, la turbine aurait tendance à l'emballement. Pour y faire face, une poulie frein à force centrifuge montée directement sur l'arbre de la turbine agit d'une façon purement mécanique sur la fermeture du vannage dès que la vitesse dépasse de 15 pour 100 la vitesse de régime, et assure cette fermeture dans un temps de l'ordre de 25 secondes.

» Il suffira donc, au moment de la remise sous tension des divers réseaux, de tenir compte de ce décalage de temps pour retrouver toutes les stations auxiliaires dans la position d'arrêt.

2° L'énergie réactive nécessaire à l'excitation des diverses gé-

génératrices charge inutilement les lignes ; pour obvier à cet inconvénient, qui peut être grave, les machines dépassant 20 kw sont toutes prévues avec un dispositif de compensation permettant sur place la production de l'énergie réactive, de façon à ce que

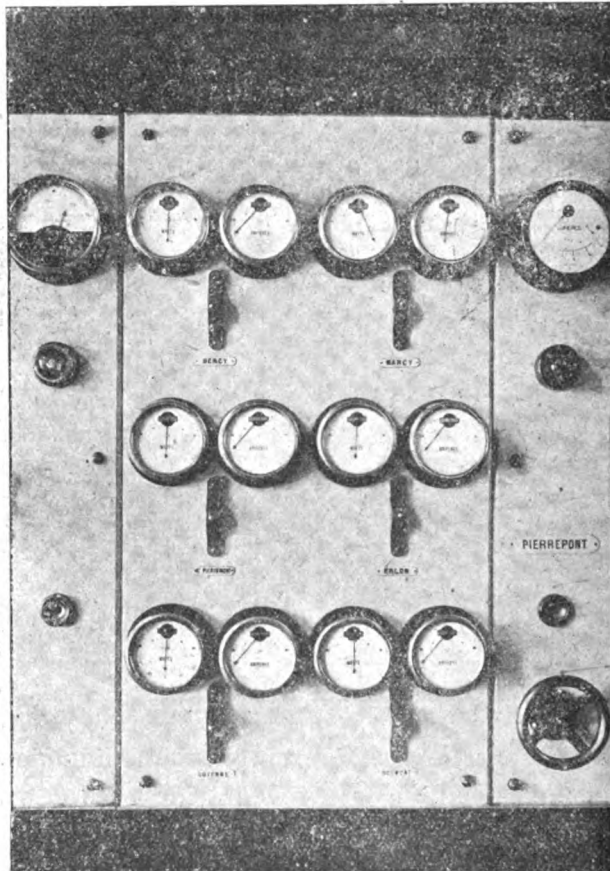


Fig. 7. — Tableau de commande de 6 stations auxiliaires
le facteur de puissance moyen ainsi réalisé soit amené à 0,95 en avant.

» A ce sujet, il est difficile d'opérer cette compensation par des génératrices synchrones synchronisées, qui présentent une insuffisance de glissement et sont autoexcitatrices, ce qui aurait des inconvénients sur le fonctionnement du réseau au moment d'une disjonction à la station génératrice centrale.

» J'ai donc pu obtenir la commande à distance des deux petites usines génératrices. Les résultats obtenus ont été suffisamment intéressants pour que je me sois assuré, en dehors de ces

installations, la disposition d'une série de chutes sur la Serre, dont la puissance minimum à l'étiage est de 300 kw, cette puissance pouvant dans la période d'hiver atteindre 350 kw. Avec la puissance ainsi obtenue, il est possible d'assurer les consommations de la totalité de pertes à vide des réseaux portant sur 120 communes et dont la puissance installée en transformateurs

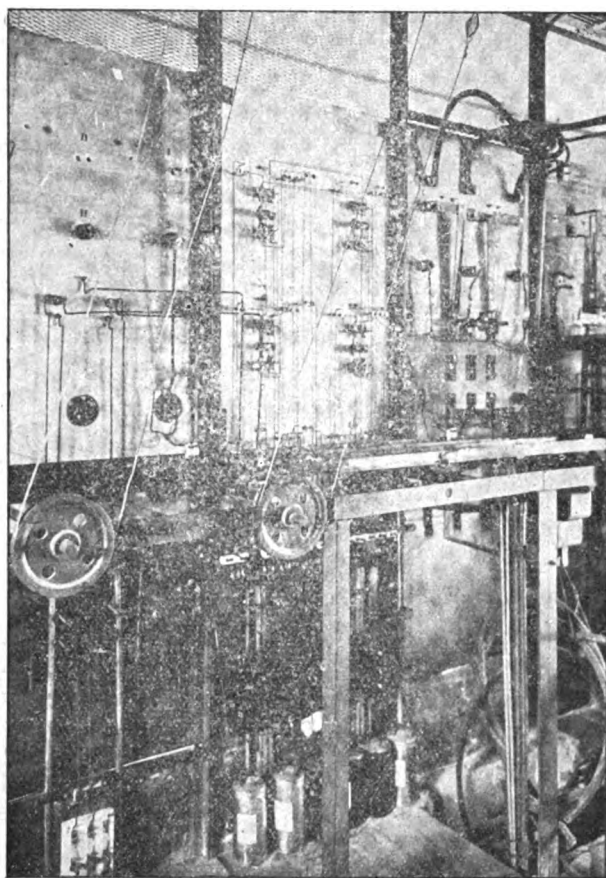


Fig. 8. — Vue postérieure du tableau de commande avec les résistances des wattmètres et les condensateurs.

sera, le réseau étant complètement équipé, de l'ordre de 2 800 kw, et d'autre part nous disposerons en outre d'une quantité d'énergie qui nous permettra de supprimer la pointe de superposition d'éclairage à la force motrice dans la période de battage s'écoulant depuis le 1^{er} octobre jusqu'à fin décembre, l'unité à vapeur de 300 -kv-A pouvant être utilisée dans les périodes de crues ou d'étiage évaluées à un maximum de 60 jours par an.

» L'opération à laquelle je me suis attaché tend surtout à éviter de grandes variations au régime de l'appel d'énergie demandée à notre fournisseur de courant, et en lui demandant de nous la fournir en écrasant les pointes dans la période d'hiver.

» Nous pourrions ainsi obtenir le résultat suivant :

» La puissance hydraulique ainsi produite, étant donné sa très bonne utilisation, nous permet d'obtenir de l'énergie dont le prix total de revient est de l'ordre de 12 centimes le kilowatt-heure, prime fixe et prix proportionnel compris.

» L'ensemble des facteurs économiques que nous aurons cherché à réaliser nous permettra donc de traiter notre clientèle de façon plus agréable en lui vendant de l'énergie à des prix plus intéressants qui sont, en tenant compte de l'index 130, de 1,40 fr le kilowatt-heure pour la lumière et 0,90 fr pour la force motrice avec des tarifs dégressifs rapides; ce tarif prévoyant une ristourne de 15 pour 100 aux syndicats des 60 communes pour faire face à l'effort financier fait par les communes syndiquées.

» La solution proposée pour l'utilisation des petites puissances hydroélectriques n'est évidemment pas universelle, et sera pour chaque montage un cas d'espèce qui sera déterminée par les dépenses de premier établissement et d'équipement des dites installations.

» Les dépenses de maçonnerie sont, dans tous les cas, le facteur de dépenses le plus important et sont proportionnellement d'autant plus élevées que la hauteur des chutes est plus faible.

» Les dépenses de maçonnerie représentent une dépense d'environ 70 pour 100 des engagements nécessaires.

» L'équipement électrique et mécanique, y compris l'installation des turbines n'entrant dans l'opération que pour environ 30 pour 100, de ce fait chaque fois que l'on se trouvera en présence d'une installation ancienne pour laquelle le gros œuvre existera, il y aura vraisemblablement intérêt à l'équipement.

» Dans le cas contraire, il est à présumer que les basses chutes inférieures à 1,50 m ne seront intéressantes qu'à la condition de présenter un débit déjà important de 4 m³/s, au minimum.

» Ce sera de toute façon une étude à faire pour chaque cas en particulier, et il ne sera possible d'installer que les puissances représentant une dépense de premier établissement sensiblement inférieure à 2 000 fr par kilowatt. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Lorfeuvre.

INFORMATIONS

COMPOSITION DES BUREAUX DES SECTIONS & ORDRE DU JOUR DE LEURS TRAVAUX FUTURS

1^{re} SECTION : Production et utilisation mécanique de l'électricité. Président : M. Roth. — Secrétaire : M. Lemenand.

Etudes en cours : Grandeur du coefficient de surcharge dans les machines. Surtensions et les moyens de les combattre. Pertes supplémentaires dans les machines.

2^e SECTION : Eclairage électrique. Président : M. Lebaupin. — Secrétaire : M. Bossu.

Etudes en cours : Eclairage des écoles. Cahier des charges pour la fourniture des lampes à incandescence pour automobiles et des lampes à atmosphère gazeuse. Lumenmètres. Eclairage des usines.

3^e SECTION : Electrochimie, Electrometallurgie. Piles. Accumulateurs. Président : M. Bunet. — Secrétaire : M. Sandström. — Secrétaire-adjoint : M. George.

Etudes en cours : Fusion de la silice au four électrique. Electrometallurgie du zinc. Etude générale des fours électriques.

4^e SECTION : Canalisations. Distribution générale. Traction. Président : M. Parodi. — Secrétaire : M. Cardon.

Organisation et études en cours :

a) *Moteurs de traction* (M. Périquier). — Electrification des chemins de fer : matériel roulant et système de contrôle dans les chemins de fer et les tramways, Sous-stations automatiques. Traction sur route.

a) *Canalisations* (M. Barillot). — Isolants des fils et câbles. Protection des réseaux. Lignes caténaires.

c) *Distribution générale, appareillage* (M. Darrieus). — Construction des lignes. Postes de transformation extérieurs.

5^e SECTION : Télégraphie, Téléphonie. Président : M. Langevin. — Président suppléant : M. Bethenod. — Secrétaire : M. Valensi.

Organisation et études en cours :

a) *Télégraphie et téléphone*. — Méthodes d'essais des appareils téléphoniques. Equilibrage des câbles téléphoniques à paires

combinables. Champs magnétique et électrique autour des lignes de transmission en courant triphasé. Télégraphie aux fréquences harmoniques avec appareils rapides. Phénomènes sur les lignes pupinisées. Analyse des courants de conversation. Perfectionnement de l'appareil Baudot. Télégraphie par le sol.

b) *Radiotélégraphie et radiotéléphonie.* — Mesure du rayonnement des antennes. Communications par ondes dirigées le long des lignes de transport. Modulation en téléphonie sans fil. Le microphone associé aux relais amplificateurs. Téléphone haut parleur. Prises de terre. Liaisons entre réseaux téléphoniques et stations radiotéléphoniques. Télémécanique. Ondes ultra sonores.

6^e SECTION : Recherches physiques. Electrophysiologie. Instruments de mesure. Président.: M. Pérot. — Secrétaire : M. Lange.

Etudes en cours : Appareils de mesure.

COMPTES RENDUS DES TRAVAUX DES SECTIONS

1^{re} SECTION

La première Section a entendu le 4 juillet, l'exposé par M. Roth d'un travail sur les pertes supplémentaires dans les machines électriques.

Ce travail indique d'abord les points restés obscurs dans le calcul des pertes, puis recherche une base pour la définition du rendement des machines électriques.

Il remarque qu'en définissant le rendement par les pertes séparées mesurées à vide, on fait abstraction de certaines pertes en charge qui peuvent mettre en danger la vie de la machine et qu'il est donc nécessaire de calculer.

Il étudie d'abord les pertes constantes :

Par ventilation et frottement d'air, considérables dans les turbo-alternateurs ;

Par frottements dans les paliers, encore insuffisamment étudiées ;

Puis les pertes dans le fer, dont la connaissance comporte encore une part d'incertitude, en raison de l'hystérésis tournante qui agit sur les molécules de fer, et dont l'effet n'a pu jusqu'ici, être suffisamment précisé ; les pertes dans le fer varient aussi suivant la forme de la courbe du flux ;

En outre, lorsque les dents sont très saturées, se produit l'effet de coque dans les dents des distanceurs, dans les plateaux de

serrage des tôles; des pertes supplémentaires par courants de Foucault sont déterminées dans le cuivre par le flux qui passe en dehors des dents ;

Des pertes à la surface des pôles sont dues à la denture de l'induit ;

Des pertes par courants de Foucault se produisent dans les couvre-enroulements ;

Des pertes résultant des courants de Foucault amortissent, dans la masse des pôles, les variations de réluctance ;

Des pertes dans les dents et dans le cuivre de l'induit, sont dues à la denture des rotors des turbo-alternateurs.

Il passe ensuite à une catégorie de pertes provenant de mauvaise exécution :

Court-circuits résultant de bavures entre les tôles et déterminant des points chauds, ce qui peut mettre la machine en danger sans abaisser sensiblement le rendement.

Comme pertes supplémentaires en charge, il énumère celles dues, dans le cuivre de l'induit, au champ propre transversal des encoches ;

Celles dues à l'action du flux de fuite dans les parties frontales des enroulements, dans les plateaux de serrage, dans les couvre-enroulements ;

Les pertes dans les amortisseurs dues aux fluctuations du flux et des harmoniques du champ de réaction ;

La perte due à la composante longitudinale du champ dans l'encoche, et qui est plus marquée en charge qu'à vide ;

Les pertes dues à la distorsion du flux et qui sont plus grandes dans les dents plus saturées ;

Les pertes dues à l'action, dans le fer, des flux de fuite de l'induit ;

Les pertes dans le fer dues à la fluctuation du flux dans les grands alternateurs type Gennevilliers ;

Les pertes, surtout marquées à vide, dans les isthmes des paquets de tôles extrêmes ;

Les pertes dans les alternateurs monophasés dues à l'action du champ inverse sur l'inducteur et sur l'induit ;

Les pertes dans les amortisseurs qui annulent ce champ induit.

Après un rappel du projet de règles pour la mesure des pertes supplémentaires dans les alternateurs qui est en discussion à l'Union des Syndicats d'Electricité, M. Roth décrit les essais en-

trepris à ce sujet par la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

Les résultats ont paru corroborer le bien-fondé de la méthode proposée, mais M. Roth s'élève contre la généralisation de cette conclusion.

Passant ensuite aux machines à courant continu, il remarque que la perte dans le cuivre de l'induit pendant la période de la commutation est mal connue.

Il termine en remarquant que, pour les transformateurs, les pertes les plus dangereuses sont les pertes supplémentaires dans le fer. La Section a décidé de faire paraître cette communication dans le Bulletin de vacances et de la discuter ensuite en séance publique.

2^e SECTION

La deuxième Section a tenu, le 10 juillet, une séance commune avec le Comité national français de l'Eclairage, pour étudier les conditions d'éclairage dans les écoles et dans les usines.

Il a été indiqué que le but de cette collaboration devait être de fournir des renseignements techniques aux ministères intéressés ; mais on a reconnu que, si une réglementation pouvait être prévue pour les écoles, il ne fallait songer à donner aux industriels que des conseils.

L'exemple des Américains, qui ont légiféré sur la question, ne paraît pas pouvoir être suivi en France.

Une sous-commission a été nommée pour étudier spécialement l'éclairage des écoles et un résumé des travaux antérieurs lui sera apporté par M. Maisonneuve.

M. Fabry a proposé de mettre à l'étude la détermination du rapport entre l'éclairement du toit d'un immeuble et l'éclairement d'une table placée à l'intérieur.

La constance plus ou moins grande de ce rapport, suivant l'état du ciel, et la position du soleil, pourrait caractériser l'immeuble au point de vue de l'éclairage.

Cette étude pourrait faire l'objet d'une thèse pour un candidat au doctorat d'ingénieur et les arrérages du legs Cheux pourraient lui être attribués.

La section décide de conserver cette question à son ordre du jour, ainsi que celle de l'éclairage du tableau noir.

Les membres de la section ont été voir, au Service des Phares, le lumenmètre de M. Blondel.

La section a reconnu la nécessité de disposer, pour les mesures de précision, d'un lumenmètre de grand diamètre. Celui du Laboratoire central d'Electricité satisfait à ce desideratum ; les dispositions prises permettent d'y photométrer jusqu'à 200 lampes par jour.

Ce n'est donc pas le manque d'appareils de mesure de flux qui peut s'opposer à l'adoption du nouveau cahier des charges.

La section a ensuite décidé, sur la proposition de M. Mariage, de compléter le cahier des charges pour lampes à atmosphère gazeuse, par l'adoption des limites de consommation spécifique, comme cela a été fait pour les lampes à vide.

3° SECTION

Le 29 juin, la troisième Section a entendu une communication de M. George sur la silice fondue fabriquée au four électrique et sur ses applications.

Le procédé employé permet d'éviter le broyage du cristal de roche et sa fusion dans le vide.

La silice fondue reçoit de nombreuses applications en électrotechnique : sa rigidité diélectrique est de l'ordre de celle du verre : elle est homogène, sans craquelure, et il ne se produit pas de condensation d'humidité à sa surface.

On peut fabriquer en silice fondue des isolateurs de 2 mètres de hauteur.

Sa dilatation est négligeable ; on fabrique des appareils optiques entièrement en silice fondue et qui peuvent être portés à très haute température.

L'absence de dilatation permet de la travailler à la meule de carborundum.

La section a ensuite entendu une communication de M. Altmayer sur l'électrometallurgie du zinc à l'Anaconda Copper Mining et C^o.

La production journalière est de 150 tonnes de zinc ; le rendement en métal est de 4,5 kg par cheval ; le rendement en énergie a atteint 89 pour 100.

4° SECTION

Le 21 juin, la quatrième Section a entendu une communication de M. Lachaise sur la théorie et l'emploi de l'abaque de Miss Clarke pour le calcul des lignes à haute tension.

L'auteur a mis en relief la précision et la facilité de maniement de cet appareil.

Les résultats obtenus peuvent être considérés comme rigoureux jusqu'à une distance de 600 km.

M. Duval a rappelé qu'il emploie pour le calcul des lignes l'abaque de M. Blondel, qu'il a matérialisé.

5^e SECTION

Le 27 juin, M. Valensi a exposé à la section les méthodes d'essai employés pour les appareils téléphoniques :

Mesure de l'efficacité, de la netteté, de l'effet Larsen ; épreuve de brûlage, d'endurance devant les hauts parleurs.

A défaut de machines suffisamment précises, les essais sont faits par des équipes alternant à la transmission et à la réception.

Les résultats sont d'une constance suffisante pour permettre de classer les appareils à coup sûr.

La mesure exacte de l'efficacité des appareils et l'élimination des appareils insuffisants permettra de réaliser dans l'établissement des lignes des économies de plusieurs millions.

La prochaine séance de la 5^e Section est fixée au 24 octobre, à 17 heures.

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

RÉUNION DE PRINTEMPS, 24-27 AVRIL 1923, A PITTSBURGH. — A cette réunion, les questions suivantes ont été discutées :

Valeur économique de la résistance à insérer dans la mise à la terre du neutre.

La bobine de réactance dans la mise à la terre du neutre.

Emploi de la bobine de Petersen.

Rapport du Comité sur la pratique actuelle de la mise à la terre dans les systèmes de transmission.

Conducteurs de 3^e classe et mécanisme de l'arc à la terre (C.-P. Steinmetz).

Surintensions dans les lignes de transmission.

Relevé de la consommation de charbon dans le réseau South Pacific.

Quelques problèmes dans la conduite des fours électriques.

Progrès dans les fours électriques de grande puissance pour les ferro-alliages.

Développement des fours électriques de fusion à grande capacité.

Etude des relais.

Système de relais de la Duquesne Light Co.

Système de relais de réactance de mise à la terre.

Relevé à distance pour le sectionnement automatique des réseaux électriques.

Eclairage et équipement électrique de l'Eastman Theater.

Le mercredi soir, au banquet de 700 couverts du William Penn Hotel, le Président Jewet insista sur la nécessité d'aménager le plus tôt possible les chutes d'eau en raison de l'épuisement plus ou moins prochain des combustibles dont les Etats-Unis disposent encore.

M. Brady préconisa l'interconnexion des usines hydrauliques et thermiques par un grand réseau couvrant la surface des Etats-Unis et du Canada : c'est ce qu'il appelle le plan de superpuissance.

M. Schuchart ajouta que l'interconnexion épargne le charbon, en poussant au maximum l'utilisation de centrales géantes, et aussi

l'argent, car, grâce à la diversité des emplois de l'énergie dans les différentes régions, il devient possible de réaliser des économies sur les frais d'installation.

Il termina en faisant appel à l'American Institute of electrical Engineers, pour étudier les meilleures caractéristiques à imposer en vue de cette interconnexion.

M. Aylesworth signala les difficultés diplomatiques, légales et administratives que soulève l'aménagement des chutes sur les grands fleuves américains.

Il nota, en passant, que l'emploi de l'électricité conditionne le rendement du travail humain, et il a donné, sans toutefois indiquer leur source, les chiffres suivants :

Les plus-values annuelles de la propriété par tête d'habitant dans divers pays avant la guerre seraient :

Etats-Unis : 116 pour 100 ;

Allemagne : 52 pour 100 ;

France : 27 pour 100 ;

Grande-Bretagne : 21 pour 100.

D'après lui, cette différence de rendement dans le travail humain serait attribuable principalement, sinon uniquement, à la généralisation plus ou moins grande de l'industrie électrique.

Il cita l'exemple des compagnies minières, qui ont pu traiter, grâce à l'emploi de l'énergie électrique, 10 millions de tonnes de minerai de cuivre à basse teneur qui n'auraient pu l'être par d'autres procédés.

Quant à l'électrification des chemins de fer, il donna l'exemple de la Butte Anaconda Pacific Railway Co, qui a remplacé une dépense mensuelle de charbon de 112 500 francs-or par une dépense d'énergie électrique de 40 000 francs-or.

Il rappela, en terminant, que la civilisation matérielle est liée au développement de la machine et que la consommation d'énergie progresse en Amérique par sauts et par bonds.

Il conclut que l'interconnexion des centres producteurs d'énergie doit amener parallèlement l'accroissement de la prospérité des ouvriers et l'abaissement des tarifs.

A la reprise des séances d'études, on traita les questions suivantes :

Surveillance des troubles d'origine atmosphérique dans un réseau de distribution (Mac Laren).

Expériences sur les bobines à réactance.

Efforts produits par les court-circuits sur les supports de réactance.

Rapport de la sous-commission du Comité d'unification sur les essais et spécifications d'isolateurs.

Le jeudi après-midi, eut lieu une visite du laboratoire à haute tension de la Westinghouse Co, à Worth Trafford, où sont effectués des essais à 1 million de volts.

On y vit un arc entretenu sur une longueur de 8 m.

A la suite d'une visite des usines de la Compagnie à Pittsburgh, cette Compagnie offrit à ses visiteurs un dîner de mille couverts.

SÉANCE ANNUELLE « D'AFFAIRES » A L'HÔTEL DES SOCIÉTÉS D'INGÉNIEURS, A NEW-YORK. — Le 18 mai 1923, il a été procédé à l'élection du nouveau Bureau entrant en fonction le 1^{er} avril.

Le nouveau président est M. Ryan, professeur d'électrotechnique à la Leland Stanford Junior University, Polo Alto, Californie, où il enseigne depuis 1905.

Il est l'auteur de nombreux travaux, notamment sur la conductivité de l'atmosphère aux hautes tensions, sur les tensions et fréquences de décharge dans l'éclateur sphérique, sur les isolateurs pour très hautes tensions.

La date de la réunion d'automne à Del Monte, Californie, a été définitivement fixée au 2 octobre 1923.

Il y sera traité des transmissions de puissance à grande distance et la médaille Edison sera remise au docteur Millikan.

Nous extrayons du rapport présenté par le Bureau, le 18 mai, les renseignements suivants :

L'American Institute of electrical Engineers comprend actuellement :

6 membres honoraires, parmi lesquels le maréchal Foch et notre président d'honneur, M. Blondel.

678 membres « Fellows », dont un Français, M. Maßen.

2 264 membres ordinaires.

12 450 membres associés.

15 398 au total.

L'augmentation nette au cours de l'année dernière a été de 1 035, soit 7 pour 100.

L'American Institute of electrical Engineers comprenait, à la date du 1^{er} mai 1923:

46 groupes locaux, qui ont tenu, au cours de l'année écoulée, 344 réunions ;

Et 68 associations affiliées, écoles ou universités, qui ont tenu 503 réunions.

CÉLÉBRATION DU 75^e ANNIVERSAIRE DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE. — Le 4 mai, les délégués de l'American Institute of electrical Engineers ont tenu, en l'honneur du 75^e anniversaire de la Société des Ingénieurs civils de France, une séance conjointe avec les Ingénieurs civils, les Ingénieurs mécaniciens, les Ingénieurs des mines et la Section américaine des Ingénieurs civils de France, sous la présidence de M. Harrington Emerson, président de cette dernière Section.

Une adresse de félicitations a été adressée à la Société des Ingénieurs civils de France, lui exprimant la gratitude des ingénieurs américains envers la France, pour les nombreuses contributions qu'elle a apportées à la profession d'ingénieur.

Dans le Bulletin de juin 1923, l'Américan Institute of electrical Engineers a inauguré un compte-rendu mensuel des travaux du Comité national de Recherches, institué au cours de la guerre.

La seule recherche intéressant les électriciens qui ait été ainsi signalée est celle d'une nouvelle méthode de calcul des pertes par courants de Foucault, dans les noyaux de fer.

Un Comité de 30 membres a été constitué pour étudier la nomenclature technique à adopter dans l'industrie de l'éclairage et pour fixer les règles de la photométrie.

M. Mailloux y représente le Comité national de la Commission électrotechnique internationale, et M. Kennelly l'American Institute of electrical Engineers.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

Le numéro de juillet donne le résultat des élections pour le Bureau qui ont eu lieu le 10 mai dernier et qui ont porté à la présidence le docteur Russell.

SOCIÉTÉ de Constructions



ALSACIENNE Mécaniques

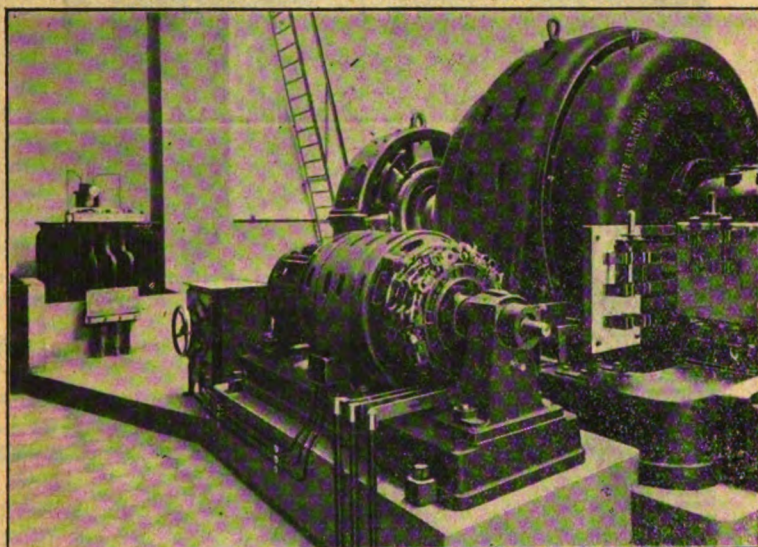
Usines à **BELFORT** (Terr.de), **MULHOUSE** (Haut-Rhin), **GRAFFENSTADEN** (Bas-Rhin)

Maison à **PARIS**, 32. rue de Lisbonne (8^e)

à **LYON**..... 13, rue Grôlée
à **LILLE**..... 61, rue de Tournai
à **NANCY**..... 21, rue St-Dizier
à **MARSEILLE** 4, rue Sainte

UNIS-FRANCE

à **ROUEN**... 7, rue de Fontenelle
à **NANTES**.. 7, rue Racine
à **BORDEAUX** 9, c^{de} du Chapeau rouge
à **TOULOUSE** 21, rue Lafayette



Compensateur de phase à collecteur installé à la Société du Gaz et de l'Électricité de Marseille, pour relever le facteur de puissance d'un moteur d'induction de 1 400 chevaux.

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Dynamos - Alternateurs - Groupes électrogènes - Transformateurs - Convertisseurs
Commutatrices - Redresseurs à vapeur de mercure - Tableaux de distribution - Moteurs
électriques de toute puissance et pour toutes applications - Commandes électriques
pour laminoirs - Machines d'extraction électriques - Tramways et locomotives élec-
triques - Appareillage haute et basse tension - Fils et câbles isolés pour l'électricité

Chaudières - Machines et turbines à vapeur

Moteurs à gaz et installations d'épuration des gaz

INSTALLATION COMPLÈTE

DE STATIONS CENTRALES ET DE SOUS-STATIONS DE TRANSFORMATION

AUTRES FABRICATIONS :

Machines soufflantes - Machines pour l'industrie textile - Machines et appareils pour
l'industrie chimique - Installation de chauffage industriel - Locomotives à vapeur
Machines-outils - Petit-outillage - Cries et Vérins UG - Bascules - Transmissions

ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ELECTRIQUES DE LYON ET DU DAUPHINÉ

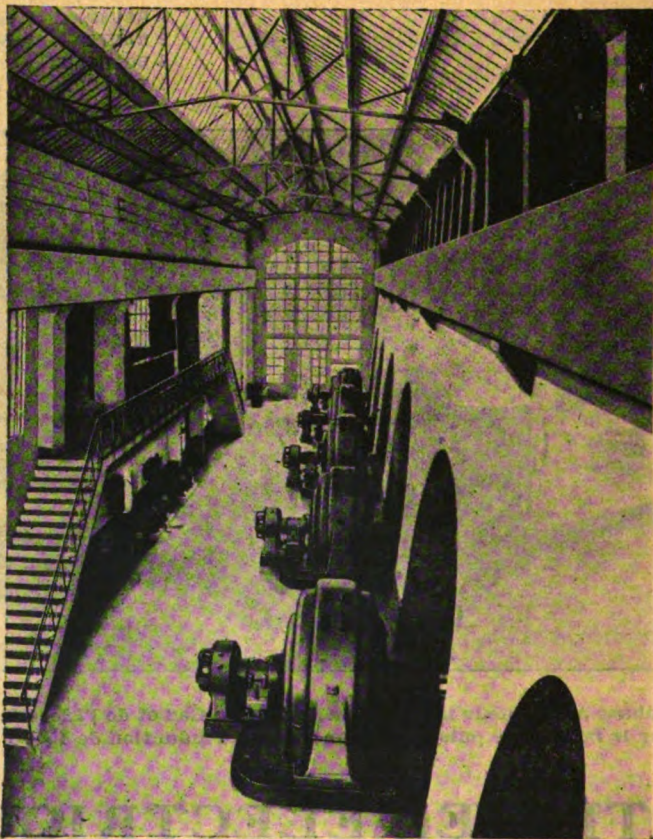
Matériel électrique Grammont - Appareillage Maljournal et Bourron

Capital social : 21 000 000 francs

SERVICES COMMERCIAUX : 10, rue d'Uzès ☎ PARIS (2^e)

Téléph : Central 1-43, 21-85 : Gutenberg 00-74

USINES : 160-220, route d'Heyrieux ☎ LYON



Centrale hydro-électrique du Drac-Romanche

5 alternateurs triphasés 2800 kV-A, 5500 volts, 50 p.s, 300 t.mn.

ALTERNATEURS DE TOUTES PUISSANCES
TRANSFORMATEURS POUR ACCOUPLEMENT DIRECT AVEC TURBINES HYDRAULIQUES
à refroidissement naturel p^r toutes tensions jusqu'à 5 000 kw
— artificiel — 30 000 —
GENERATRICES ET MOTEURS A COURANT CONTINU
COMMUTATRICES, GROUPES CONYERTISSEURS DE TOUTE PUISSANCE
ET DE TOUTE NATURE
MOTEURS POUR LAMINOIRS ET MACHINES D'EXTRACTION
MOTEURS A GRANDE VITESSE POUR POMPES ET VENTILATEURS
MATERIEL DE TRACTION. — MOTEURS ET EQUIPEMENTS
EQUIPEMENT COMPLET DE STATIONS CENTRALES
ET DE POSTES DE TRANSFORMATION

Agences à Lyon, Marseille, Toulouse, Grenoble, Bordeaux, Nancy, Nantes, Alger, Lille, Limoges et Bruxelles.

SOCIÉTÉ GRAMME

Anonyme au Capital de 3 500 030 Francs

USINES :

26, RUE D'HAUTPOUL, Paris
29, RUE D'HAUTPOUL, Paris
200, RUE DE PARIS, Pantin

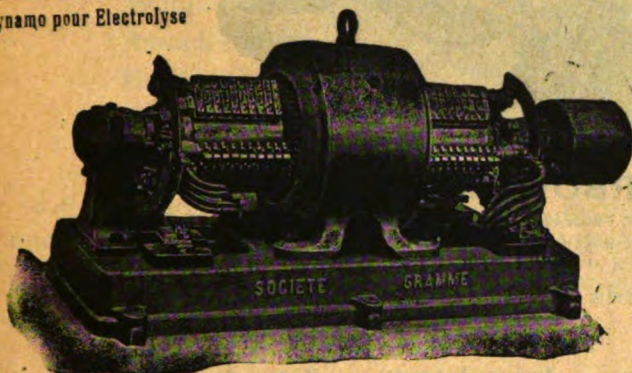
Siège social :

26, RUE D'HAUTPOUL
PARIS (19^e)



Matériel à courant continu et alternatif

Dynamo pour Electrolyse



MANUFACTURE
DE
LAMPES
à incandescence

TÉLÉPHONE : NORD { 02-01
15-39

TÉLÉGRAPHE : GRAMME-PARIS

Ateliers de Constructions électriques

Société anonyme au Capital de
40 MILLIONS DE FRANCS *du Nord et de l'Est*

Siège Social : 75, Boulevard Haussmann, Paris 8^e

ATELIERS : : : : :
CABLERIE : : : : :
FONDERIES : : : : :
ACIÉRIES : : : : :
TRÉFILIERIES : : : : :
LAMINOIRS : : : : :
MANUFACTURE D'ISOLANTS

JEUMONT (Nord)

APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE

USINES et ATELIERS : 194, Avenue Président Wilson, LA PLAINE St-DENIS (Seine)

MATÉRIEL DE TRACTION ÉLECTRIQUE — GROUPES MOTEURS
GÉNÉRATEURS ET TURBO-ALTERNATEURS — PONTS ROULANTS
TREUILS — LOCOMOTIVES DE CANAUX ET DE MINES — MACHINES
D'EXTRACTION ET TOUTES APPLICATIONS ÉLECTRO-MÉCANIQUES
CABLES ARMÉS — FILS NUS ET ISOLÉS — CAOUTCHOUC MANU-
: : : FACTURÉ — TUBES — BOITES — OBJETS MOULÉS : : :

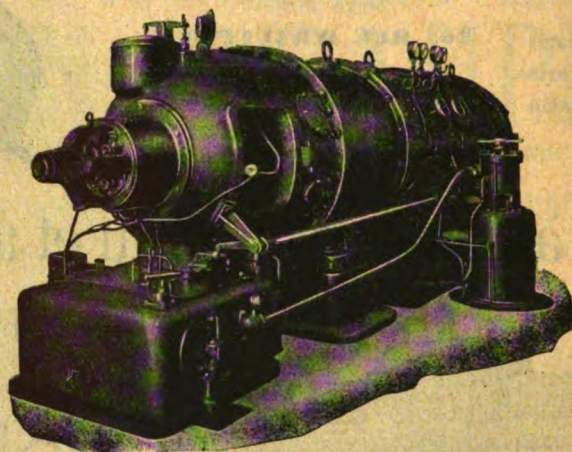
AGENCES

PARIS : 75, boulevard Haussmann — NANTES : 20, rue Mercœur
LYON : 4, rue Président Carnot — ROUEN : 1, rue Gambetta — LILLE : 34, rue Faidherbe
MARSEILLE : 8, rue des Convalescents — METZ : 37, Avenue Maréchal Foch

ANCIENS ÉTABLISSEMENTS SAUTTER-HARLÉ

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 8 000 000 FRANCS
16 à 26, avenue de Suffren * PARIS (xv^e)

UNIS
FRANCE



Téléphone
Saxe 11-88

TURBO-MACHINES

Groupes électrogènes à turbine radiale à double rotation système **Ljungström**
à très faible consommation de vapeur

pour les STATIONS CENTRALES et pour la PROPULSION ÉLECTRIQUE des NAVIRES

POMPES centrifuges * COMPRESSEURS d'air

MACHINES ÉLECTRIQUES :: MOTEURS A VAPEUR ET A PÉTROLE

Compresseurs d'Air à Pistons — Appareils de Levage — Machines Frigorifiques

Ancienne Maison J. BRUNT et C^{ie}

COMPAGNIE CONTINENTALE

POUR LA FABRICATION

DES COMPTEURS ET AUTRES APPAREILS

Société Anonyme au Capital de 12 500 000 francs



SIÈGE SOCIAL : 17, Rue d'Astorg, PARIS
(Ci-devant : 9, Rue Pétrelle)

Téléph. : ELYSÉE { 34-65 Adresse Télégraphique :
36-59 COMPTEURS - BRUNT - PARIS

Usine à COLOMBES : 432, rue de Rueil

Téléphone : WAGRAM 91-24

COMPTEURS D'ÉLECTRICITÉ

POUR COURANT CONTINU

ET POUR COURANT ALTERNATIF, MONOPHASE, DIPHASE ET TRIPHASE

COMPTEURS A DÉPASSEMENT A DOUBLE TARIF -- COMPTEURS D'ÉNERGIE RÉACTIVE
COMPTEURS A INDICATEUR DE MAXIMUM

Il annonce la prochaine publication de la table décennale des matières contenues dans le journal pour la période 1912-1921. (1).

Il indique le montant des cotisations des diverses classes de membres, à la suite des réductions qui y ont été récemment apportées.

Ces cotisations sont les suivantes :

	£	sh	p
Membres	4	15	0
Membres associés	3	5	0
Associés	4	5	0
Gradués	2	5	0
Etudiants jusqu'à 21 ans	1	1	0
Etudiants de moins de 21 ans	1	11	6

Le Comité de rédaction rappelle aux membres de l'Institution que le journal leur est ouvert pour la publication d'articles courts ou condensés sur les nouveautés électrotechniques dont ils seraient les auteurs.

ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Le bulletin N° 6 de 1923, publié par l'Association, contient le rapport à l'Assemblée générale sur l'année 1922.

Ce rapport donne la liste d'unification des hautes tensions fixée comme suit, le 16 décembre 1922, par l'Assemblée générale d'Olten.

A l'extrémité réceptrice des lignes :

a) Au-dessous de 100 kilovolts:

3 400, 5 800, 8 000, 10 000, 17 000, 34 000, 45 000, 58 000 volts ;

b) Au-dessus de 100 kilovolts et avec une marge de ± 10 pour 100 :

110 000, 150 000, 220 000 volts.

Le Comité a entrepris, d'autre part, de fixer les tensions maxima aux bornes des appareils générateurs, ainsi que les méthodes et tensions d'essai qui devront être appliquées au matériel à haute tension.

Le même rapport mentionne que l'Association a été représentée au Congrès tenu à Milan en octobre 1922, par l'Associazione elet-

(1) Un exemplaire de cette table sera offert à la Société française des Electriciens et sera déposé à la bibliothèque, à la disposition des membres de notre Société.

trotecnica italiana, à l'occasion du 25^e anniversaire de sa fondation.

Le même bulletin contient une instruction pour la protection des installations à courant alternatif contre les surtensions, instruction établie par la Commission compétente de l'Association.

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

Réunion du Groupe de Turin du 16 mai 1923. — Le Président, M. Soleri, a annoncé que le Congrès annuel de l'Association se tiendrait à Venise pendant la première quinzaine d'octobre et que, parmi les sujets traités, figurerait principalement celui des applications agricoles.

Il a annoncé la publication par le Siège central des normes concernant les machines électriques.

M. l'ingénieur Italo Bertoglio a ensuite parlé de l'emploi de l'électricité sur les automobiles.

Le 26 mai, l'ingénieur Civita a fait, dans le salon de la Chambre de Commerce, une conférence sur l'utilisation de l'énergie électrique pour la solution du problème agricole. En terminant, l'orateur a fait appel à une action concertée des diverses institutions techniques et agricoles pour faire connaître aux agriculteurs les avantages de l'emploi de l'énergie électrique.

BIBLIOGRAPHIE

Télégraphie et Téléphonie sans fil, par C. Gutton, 3^e édition, refondue et mise à jour ; 1 vol. 18 cm × 11 cm, de 216 pages, avec 126 figures (« Collection Armand Colin » n° 6). Paris, Armand Colin, 1923.

Les questions de radiotélégraphie et de radiotéléphonie préoccupent aujourd'hui non seulement les techniciens, mais un grand nombre d'amateurs. Ceux-ci emploient pour écouter les concerts émis par la Tour Eiffel, Radiola et le poste des Télégraphes. Ils poussent même leur ambition plus loin et voudraient comprendre comment sont produites ces ondulations de l'éther qui lui transmettent ces auditions. Expliquer à des personnes qui ne sont pas très au courant de la physique moderne les principes de la télégraphie sans fil est malheureusement une œuvre délicate. Le savant professeur à la Faculté des Sciences de Nancy s'en est brillamment acquitté, et son petit opuscule est certainement l'ouvrage de vulgarisation le plus clair et le plus complet. Il a du reste été soigneusement tenu à jour et le lecteur y trouvera les derniers progrès réalisés dans les procédés de réception comme la superhétérodyne de Lévy ou la superréaction d'Armstrong.

Nous ne saurions donc trop conseiller sa lecture à tous ceux qui, sans être des techniciens, s'intéressent à la radiotélégraphie, en ajoutant du reste que même pour les techniciens, cette lecture ne sera pas sans utilité.

Traité de télégraphie électrique, par H. Thomas, inspecteur général honoraire des Postes et Télégraphes. — Deuxième édition revue et augmentée ; 1 vol. relié toile 28 cm × 19 cm de 1 214 pages, avec 939 gravures. Paris, Ch. Béranger, 1922.

La première édition de cet excellent ouvrage (1894) avait eu autrefois beaucoup de succès en France et aussi à l'étranger. Les nombreux perfectionnements du télégraphe depuis cette époque, ont nécessité une refonte complète, mais le plan général de l'ouvrage est resté le même.

A côté de la description pratique de tous les systèmes de télégraphie (Morse, Baudot, Wheatstone, Siemens, multiple américain, etc...), il y a une partie théorique également très importante où l'on trouve l'étude de la formation des signaux télégraphiques, en tenant compte de la self-induction et de la capacité des lignes.

On trouve également dans l'ouvrage une centaine de pages consacrées aux câbles sous-marins, aux travaux de leur pose et de leur réparation, à la théorie de leur immersion, etc.

Enfin l'auteur a introduit dans cette édition un exposé élémentaire de la télégraphie sans fil.

Installations téléphoniques. — Guide pratique à l'usage des monteurs des Postes, Télégraphes et Téléphones, par S. Schils, directeur honoraire des Postes, Télégraphes et Téléphones, et C. Cernet, directeur des cours aux ateliers des Postes, Télégraphes et Téléphones, 4^e édition, 21 cm × 13 cm, 379 pages. Paris, Dunod, 1923.

Ce petit ouvrage à caractère simple et pratique, a été écrit spécialement pour servir à l'instruction des ouvriers monteurs des Postes, Télégraphes et Téléphones. L'édition actuelle (la quatrième), a été profondément remaniée par M. Cernet pour tenir compte du développement pris par les installations téléphoniques modernes (batterie centrale, relais de coupure à distance des longs circuits téléphoniques, appareils pour cabines téléphoniques publiques, etc.). L'ouvrage reste néanmoins conforme à sa destination primitive.

Constantes fondamentales et facteurs de conversion

Le Comité américain des Tables internationales critiques vient de faire paraître, à l'usage des experts, une brochure contenant les valeurs des constantes, des unités de mesure et des facteurs de conversion.

La même liste contient le logarithme des dites valeurs.

La brochure est en vente au Comité national des Recherches : Tables internationales Critiques, Washington D. C., contre envoi de 1,25 franc or.

IL Y A TRENTE ANS

Communications techniques et communications diverses. — M. Lejeune présente un galvanomètre portatif à lecture directe Ducretet et Lejeune permettant de mesurer les résistances d'isolement jusqu'à 100 mégohms.

M. de Nerville, directeur du Laboratoire central d'Electricité, décrit les nouvelles installations de la rue de Staël.

En terminant, il fait un nouvel appel à la générosité des donateurs pour fournir les appareils dont le besoin se fait le plus vivement sentir.

M. Hillairet présente une note de M. Jules Garnier, d'après laquelle cet ingénieur a réussi à cémenter sur une longueur de 10 mm, l'extrémité d'une barre d'acier ne contenant primitivement que 1/1000^e de carbone. Il la place bout à bout avec un crayon de charbon de cornue, le contact des barres est porté vers 1 000° dans un four à moufle et il est traversé par un courant de 55 ampères sous 7 volts qui suffit à transporter le carbone.

Le même numéro du Bulletin reproduit le règlement intérieur du Laboratoire central d'Electricité.

Il annonce la mort de Marié Davy, inventeur de la pile au sulfate de mercure qui fut pendant longtemps seule en usage pour les transmissions télégraphiques.

Le Gérant : J. GUYOT.

Imp. Henriot, 20, rue Gerbert, PARIS.

Library

DEC 1 1923

OME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 28.

AOUT-SEPTEMBRE-OCTOBRE 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.
Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS
SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
ÉDITEUR
12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

C. Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine), au HAVRE et à LYON

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR (Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en France

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE (Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

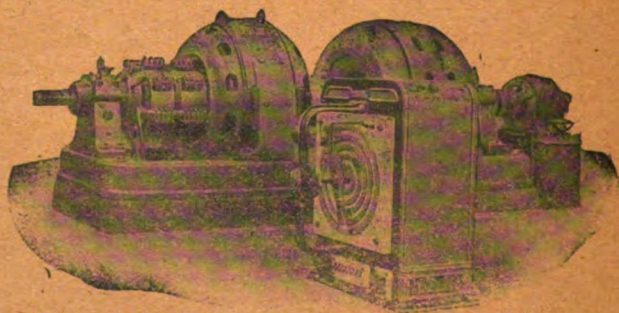
C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

Capital 15 Millions de Francs.

Siège social : NANCY, Rue Oberlin

Usines à : NANCY, NANTERRE NANTES

Maison à PARIS : 26, Rue Lafayette (IX^e)



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Les pertes d'énergie dans les diélectriques (M. J. GRANIER), p. 333. — Les pertes supplémentaires dans les machines électriques (M. ROTH), p. 483. — Les phénomènes de surtension dans l'électrolyse et les colloïdes (MM. MARIE et AUDUBERT), p. 508. — Calcul des lignes de transmission à grande distance, (M. DARRIEUS), p. 534.

INFORMATIONS, p. 571.

LES PERTES D'ÉNERGIE DANS LES DIÉLECTRIQUES ⁽¹⁾

INTRODUCTION

I. GÉNÉRALITÉS. — L'étude expérimentale des diélectriques est intéressante pour un certain nombre de raisons :

Les tensions utilisées dans l'industrie sont de plus en plus élevées et ne sont actuellement limitées que par la difficulté de donner aux isolants une rigidité électrostatique suffisante ; or, celle-ci est intimement liée aux pertes qui s'y produisent.

Pour les fréquences élevées, en téléphonie et en radiocommunication par exemple, une notable partie de l'énergie est absorbée dans les diélectriques.

Enfin, une étude expérimentale seule peut nous permettre de choisir entre les différentes théories proposées et nous renseigner sur la nature intime de ces pertes.

II. CLASSEMENT. — On peut classer les diélectriques en plusieurs catégories :

A. *Diélectriques parfaits*. — Ils restituent instantanément à la décharge toute la quantité d'électricité qu'ils ont absorbée à la charge. Exemple : air, soufre.

B. *Diélectriques imparfaits sans fuites*. — Ils restituent encore

⁽¹⁾ J. GRANIER, *Thèse de Doctorat*, Paris, 1923.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

toute la quantité d'électricité qu'on leur a fournie, mais la décharge est plus ou moins lente. Exemple : certains échantillons de mica ou d'ébonite.

C. *Diélectriques imparfaits avec fuites.* — Ils ne restituent qu'une partie de la quantité d'électricité absorbée à la charge.

Il ne paraît pas exister de condensateur constitué avec un diélectrique homogène possédant des fuites sans résidus.

III. DIÉLECTRIQUES PARFAITS. — L'étude expérimentale des diélectriques parfaits est simple ; elle se réduit à la détermination du pouvoir inducteur spécifique. Leur étude théorique a donné lieu, par contre, à des travaux considérables : pour pouvoir appliquer la loi de Coulomb sans admettre que la force qui s'exerce entre deux masses dépend du milieu interposé, on a été amené à considérer les diélectriques comme susceptibles de se polariser sous l'influence du champ électrique. Cette manière de voir, qui fait jouer au diélectrique un rôle actif, permet de concevoir dans leur masse des courants de déplacement produisant les mêmes effets magnétiques que les courants de conduction ; à cause de sa souplesse, elle est aujourd'hui universellement adoptée.

IV. DIÉLECTRIQUES IMPARFAITS. — Ils ont donné lieu, depuis le milieu du siècle dernier, à un grand nombre de recherches. Voici les principaux résultats expérimentaux obtenus :

A. *Courant continu.* — Les résidus ne proviennent pas d'une pénétration des charges dans les parties du diélectrique qui sont en contact direct avec les armatures ; le contact, en effet, n'est pas nécessaire, et les résidus se produisent très bien lorsque le diélectrique est séparé des armatures par des intervalles d'air.

Les résidus ne proviennent pas d'une conductibilité uniforme du diélectrique. En effet, dans le cas du contact, le courant de charge d'un condensateur à mica ou à ébonite tend vers zéro au bout d'un temps fini ; de plus, dans le cas du non contact, la charge des armatures est plus faible que si la lame diélectrique était remplacée par une lame métallique de même épaisseur. Il existe donc des diélectriques à résidus s'opposant absolument à un passage permanent d'électricité.

Un diélectrique à résidus *se polarise lentement* dans un champ électrique. Constituons, par exemple, le diélectrique d'un con-

densateur par deux lames d'ébonite superposées, et chargeons-le pendant un temps suffisamment long. Retirons ensuite les plaques d'ébonite et étudions leur état électrique : nous constatons que chacune d'elles est neutre au cylindre de Faraday, mais agit sur un électroscope. Puisque leur masse totale est nulle et qu'elles sont capables de produire un champ électrique, c'est qu'elles sont polarisées ; rien ne nous prouve, d'ailleurs, que cette polarisation *réelle* est de même nature que celle dont nous avons *supposé* l'existence dans les diélectriques parfaits.

Le pouvoir inducteur spécifique correspondant à la charge très rapide d'un condensateur à résidus est bien déterminé et caractérise le diélectrique. Au contraire, la grandeur des résidus varie suivant la provenance de l'échantillon étudié. En outre, la chaleur et l'humidité qui agissent relativement peu sur le pouvoir inducteur spécifique ont une action considérable sur les résidus.

Les diélectriques obéissent en général, à la loi de superposition : Si deux tensions A et B appliquées séparément produisent des courants représentés en fonction du temps par les courbes a et b , le courant produit par la tension $A + B$ sera représenté par la courbe obtenue en additionnant les ordonnées de a et de b .

Il peut arriver qu'un certain temps après la suppression du champ extérieur la polarisation moyenne change de signe à l'intérieur du diélectrique. Si, par exemple, on soumet un condensateur pendant longtemps à une certaine tension, puis pendant un temps relativement court à une tension de sens inverse et qu'enfin, on le mette en communication permanente avec un galvanomètre, on constate que le courant de décharge diminue peu à peu puis change de signe ; ce courant est déterminé au début par la dernière tension appliquée, à la fin par la première.

B. Courant alternatif. — D'autres recherches avaient été effectuées parallèlement en courant alternatif ; elles ont abouti à des résultats beaucoup moins sûrs. Les premières expériences ont porté sur l'échauffement des condensateurs, mais les conditions d'essai étaient tout à fait défavorables ; les tensions, fournies par des machines électrostatiques ou par des bobines d'induction, étaient mal déterminées ; les échauffements, mesurés par des soudures thermoélectriques mal protégées contre le

refroidissement étaient trop faibles. Aussi les résultats furent-ils souvent contradictoires.

Plus tard, on réussit à montrer que les diélectriques à résidus étaient le siège, en courant alternatif, d'une hystérésis plus ou moins visqueuse ⁽¹⁾ et l'on put tracer des cycles correspondant à des fréquences et à des tensions différentes. Malheureusement, les résultats de ces expériences délicates ne peuvent être considérés que comme qualitatifs.

On reconnut également que, dans un champ électrique tournant, les diélectriques à résidus sont soumis à un couple qui tend à les entraîner dans le même sens que le champ ; de même, un tel diélectrique, oscillant dans un champ constant est soumis à un amortissement supplémentaire. L'étude de ces deux phénomènes est très difficile et n'a donné aucun résultat certain.

Entre temps, les mesures calorimétriques furent reprises, mais, pour que les phénomènes fussent plus réguliers, on s'adressa à des tensions sinusoïdales et on choisit des fréquences ou des capacités suffisantes pour que l'échauffement fût directement mesurable au thermomètre.

Enfin, plus récemment, les progrès accomplis dans la construction des appareils de mesure électriques ont permis de mesurer facilement les pertes au wattmètre et de multiplier les expériences.

Nous aurons l'occasion de revenir plus tard sur toutes ces méthodes et de les étudier en détail. Bornons-nous ici à indiquer les résultats expérimentaux obtenus avant nous :

La puissance absorbée par les diélectriques en courant alternatif est, en général, proportionnelle à une certaine puissance de la tension qui oscille, suivant les auteurs, entre 1,5 et 2,5. Elle varie ordinairement dans le même sens que la température et paraît à peu près proportionnelle à la fréquence.

On voit que ces résultats sont fort peu précis ; nous connaissons actuellement assez bien l'allure des phénomènes, mais nous ne possédons encore aucune loi sûre qui nous permette de calculer à l'avance l'énergie absorbée dans des conditions déterminées. Les contradictions entre les résultats des diverses expé-

(¹) Un cycle de viscosité dépend de la fréquence ; un cycle d'hystérésis en est indépendant.

riences que nous venons de rappeler tiennent, pensons-nous, aux causes suivantes :

1° Les divers échantillons d'une même substance ne donnent pas, dans les mêmes conditions, des résultats identiques; cela se produit à plus forte raison pour des substances différentes. Il faut donc, si l'on veut obtenir des lois générales, opérer sur un nombre considérable de condensateurs.

2° Les méthodes de mesure sont presque toutes entachées d'erreurs systématiques. Il faut donc opérer sur chaque échantillon avec plusieurs méthodes.

3° La précision des mesures étant relativement faible, il n'est possible de mettre en évidence l'influence de la tension ou de la fréquence que si l'on fait varier celles-ci dans de très larges limites.

4° Pour que les résidus ne soient pas négligeables devant la charge instantanée, il convient d'opérer sur de *très mauvais* condensateurs.

V. PROGRAMME. — J'ai essayé de préciser les résultats précédemment obtenus ; l'expérience m'a montré que les pertes dépendent beaucoup moins de la nature chimique du diélectrique que du soin que l'on a apporté à son épuration et à la confection du condensateur. L'étude spéciale d'un échantillon ne présente, par suite, qu'un intérêt relatif et je me suis surtout attaché à perfectionner les méthodes de mesure et à les comparer entre elles.

Le chapitre I contiendra les résultats obtenus en courant continu.

Dans le chapitre II, je tracerai le cycle de viscosité sous tension sinusoïdale et j'en déduirai la capacité et les pertes.

Dans le chapitre III, j'exposerai des méthodes plus rapides qui permettent d'étudier les condensateurs sans nécessiter le tracé complet du cycle.

Dans le chapitre IV, je montrerai l'influence que peuvent avoir sur les pertes les causes les plus diverses.

Enfin, je grouperai dans le chapitre V un certain nombre de considérations théoriques ; je chercherai, d'abord, le minimum de paramètres nécessaires pour caractériser un condensateur ; je terminerai en discutant les diverses théories qui se proposent d'expliquer la viscosité diélectrique.

VI. — SOURCES DE COURANT UTILISÉES. — Les courants utilisés dans mes expériences étaient de fréquences très différentes, et il m'était impossible de les produire tous avec la même machine ; avant de commencer l'étude des diélectriques, je dirai quelques mots des générateurs employés :

A. *Fréquences très basses* (au-dessous de quelques périodes par seconde). — Il est impossible dans ce cas de se servir d'un alternateur, les forces électromotrices d'induction étant trop faibles pour ces fréquences. La solution employée ordinairement consiste à utiliser un contact qui glisse d'un mouvement uniforme sur un fil parcouru par un courant constant. J'ai utilisé ce dispositif en le modifiant légèrement de manière à obtenir une tension sinusoïdale.

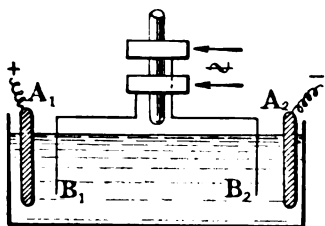


Fig. 1.

Dans une cuvette rectangulaire (fig. 1), remplie d'eau acidulée, plongent deux larges lames de plomb A_1 A_2 qui tapissent entièrement deux côtés opposés ; deux autres électrodes mobiles B_1 B_2 constituées par des fils de cuivre verticaux sont portées par un axe vertical animé d'un mouvement de rotation uniforme. En alimentant les électrodes fixes de ce rhéostat à 110 volts continus par exemple, on obtient facilement entre les électrodes mobiles une tension qui varie sinusoïdalement entre -80 volts et $+80$ volts. La proportion d'acide ne doit pas être exagérée pour que la dépense de courant ne soit pas trop forte, mais elle doit être suffisante pour que les lignes de courant dans le liquide ne soient pas déformées par la dérivation due au courant de charge des condensateurs.

Les variations de fréquence sont obtenues en modifiant la composition du train d'engrenages qui relie l'appareil au moteur électrique qui l'entraîne. Lorsque la fréquence dépasse 2 par seconde, on remplace, pour éviter les projections, le liquide par un épais tapis imprégné d'eau acidulée.

B. Fréquences industrielles. — Je disposais de deux groupes-moteurs générateurs.

1° Alternateur monophasé tétrapolaire de 3 kv-A, entraîné par un moteur à courant continu, fonctionnant sous 110 volts ; l'induit de l'alternateur était lisse, bobiné en anneau ; on réglait la fréquence en alimentant l'induit du moteur par un nombre variable d'accumulateurs. Cette disposition donnait toute satisfaction au point de vue de la stabilité du régime ; en outre, la courbe de tension était une bonne sinusoïde.

2° Alternateur d'expériences, entraîné par un moteur à courant continu de 4 kw sous 220 volts. L'inducteur portait 12 pôles que l'on pouvait grouper à volonté de manière à obtenir des fréquences de 25, 50, 75 ou 150 périodes par seconde ; on pouvait de même, en groupant convenablement les bobines induites, obtenir des courants monophasés, diphasés ou triphasés.

Le moteur était alimenté par le courant du secteur, ce qui ne permettait un réglage précis ni pour la vitesse ni pour la tension ; en outre, sauf à la fréquence 150 p : s, la courbe de tension était relativement mauvaise. Aussi cet alternateur n'a été utilisé que pour des fréquences de 75 ou 150 p : s, impossibles à obtenir avec le premier ou lorsque j'avais besoin de courant diphasé.

C. Fréquences téléphoniques. — Je me servais d'un alternateur de radiotélégraphie du type K pour avions. Cet appareil se compose d'un alternateur à fer tournant et d'une machine à courant continu disposés dans la même carcasse ; la fréquence est de 900 p : s à la vitesse normale de 4 500 t : mn.

La force électromotrice de cet alternateur est riche en harmoniques, ce qui est un grand inconvénient pour les mesures ; en particulier au pont, on ne peut obtenir le silence absolu que si la tension d'alimentation est bien sinusoïdale. J'ai dû pour réaliser cette condition, faire subir au terme fondamental deux résonances successives. L'alternateur débitait sur un condensateur de 4 microfarads, une bobine de self-inductance à fer variable, un ampèremètre et une bobine de couplage ; celle-ci agissait sur un deuxième circuit contenant une capacité variable par crans entre 2 et 3 microfarads, un ampèremètre, un variomètre et deux bobines de self-inductance fixes sans fer ; l'une de celles-ci alimentait le pont.

Au début, j'employais comme moteur l'excitatrice de l'alternateur et je me suis alors heurté à une difficulté. Pour qu'il y ait

élimination suffisante des harmoniques, il faut que la résonance soit intense, ce qui conduit à un champ de résonance très limité ; dans ces conditions, une petite variation de vitesse influe beaucoup sur le courant débité par l'alternateur ; inversement une très légère modification dans la constitution du circuit de résonance influe beaucoup sur la charge et par suite sur la vitesse de l'alternateur ; le régime est donc très instable. J'ai été obligé, pour pouvoir faire des mesures précises, d'entraîner l'alternateur par un moteur séparé de 2 kw qui maintenait la vitesse rigoureusement constante malgré les variations du courant débité.

D. Haute fréquence. — Je n'ai utilisé que des ondes entrete-

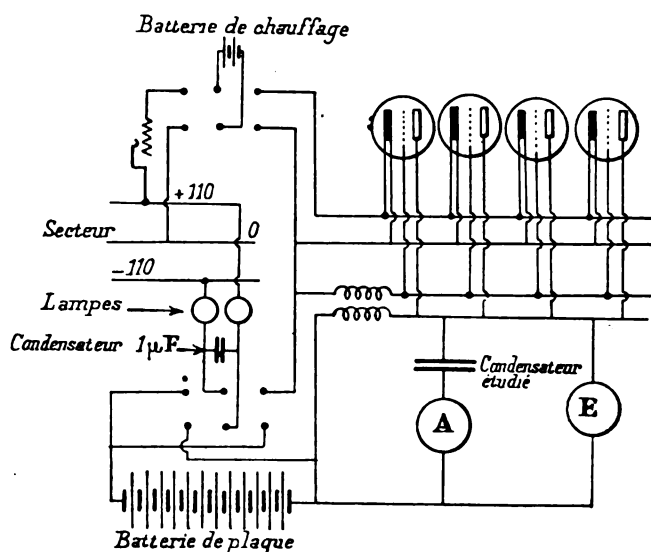


Fig. 2.

nues produites par des générateurs à lampes. Le montage variait légèrement suivant le but proposé ; pour les essais calorimétriques aux fréquences les plus élevées, voici la disposition adoptée (fig. 2) :

4 lampes sont montées en parallèle. Le courant de chauffage est pris sur une batterie de 3 éléments de 200 A-h ; le courant plaque est fourni suivant les cas par 2 batteries de 90 volts, 1 A-h ou par ces batteries en série avec le secteur à 220 volts. La bobine de grille est divisée en 4 sections qui permettent de réaliser entre les deux circuits le couplage minimum, ce qui correspond à une onde bien sinusoïdale ; la bobine de plaque est divisée en 10 sections, de sorte que l'on peut obtenir un certain nombre de longueurs d'onde pour une même capacité.

CHAPITRE I

PERTES EN COURANT CONTINU

I. CONDENSATEURS SANS FUITES, AVEC OU SANS RÉSIDUS. — A. Un *diélectrique* parfait restitue à la décharge toute l'énergie qu'on lui a fournie pendant la charge; on pourrait penser, par analogie, que l'utilisation à tension constante d'un *condensateur* dont le diélectrique est parfait entraîne, dans tous les cas, un rendement égal à l'unité. La question mérite cependant d'être examinée de plus près; avant d'aller plus loin, il convient de préciser ce que l'on entend par tension constante.

On peut imaginer d'abord que la tension est prise sur les barres d'une puissante usine et que les connexions sont faites en de grosse section.

Si on alimente ainsi un condensateur dont le diélectrique est parfait, le courant au début, est très grand et simplement limité par la résistance des armatures; lorsque, à fin de charge, le condensateur a emmagasiné la quantité d'électricité M , sous la tension V , il ne possède qu'une énergie électrostatique égale à $\frac{1}{2} MV$, tandis que l'usine a fourni MV ; la différence $\frac{1}{2} MV$ a été transformée en chaleur par effet Joule dans les armatures.

Si l'on suppose, au contraire, que la source de courant est une batterie de piles ordinaire, au début, c'est seulement par la résistance de la batterie que l'intensité est limitée; c'est dans la pile même que se produit la chute de tension. Le condensateur n'est plus soumis à une tension effectivement constante et l'effet Joule dans les armatures est négligeable si la résistance de la pile de charge est bien supérieure à celle des armatures. L'énergie emmagasinée dans le diélectrique n'est encore que la moitié de celle qu'a fournie la pile; l'autre moitié a été transformée en chaleur, tant dans les armatures que dans la pile.

B. — Dans un condensateur à résidus sans fuites, il n'en est plus tout à fait ainsi.

Sous tension *rigoureusement* constante, la charge se fait d'abord très rapidement, de sorte qu'il se dégage dans les armatures de la chaleur par effet Joule; ensuite se produit la charge de la capacité résiduelle avec une intensité beaucoup plus faible et un effet Joule négligeable dans les armatures; pendant

tout le temps que dure cette dernière charge, il se produit dans le diélectrique même un dégagement de chaleur. Finalement, quand le condensateur est complètement chargé, la moitié de l'énergie fournie par l'usine a été emmagasinée, l'autre moitié s'est transformée en chaleur, tant dans les armatures que dans le diélectrique.

Avec une pile résistante, les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, l'énergie emmagasinée est encore la moitié de l'énergie électrique fournie par la pile, mais il s'est dégagé dans celle-ci même une certaine quantité de chaleur. La répartition de la chaleur entre la pile, les armatures et le diélectrique ne peut être précisée davantage dans le cas général ; ce problème est d'ailleurs sans intérêt et il est inutile de s'en occuper davantage.

Ainsi donc, si on charge un condensateur au moyen d'une source à courant continu, quelle que soit la résistance de cette source et celle des armatures, que le diélectrique possède ou non des résidus pourvu qu'il n'ait pas de fuites, la moitié de l'énergie électrique seulement est emmagasinée dans le diélectrique, l'autre étant transformée en chaleur ⁽¹⁾.

Dans le cas de condensateurs à fuites auxquels sont consacrés les paragraphes suivants, au début de la charge, les choses se passent de la même manière ; ensuite, la quantité d'électricité emmagasinée dans le diélectrique devient, à cause des fuites, de plus en plus inférieure à celle qu'a fournie la pile ; à cette perte de charge correspond une perte d'énergie bientôt plus considérable que celle qu'avaient produite au début les résidus. Ces pertes dues aux fuites étant de beaucoup les plus importantes, il est intéressant de connaître suivant quelles lois elles s'effectuent.

A cette question, le principe de superposition répond : « La quantité d'électricité perdue par les fuites est proportionnelle au temps et à la tension ».

Je me suis proposé de vérifier expérimentalement s'il en était ainsi dans tous les cas.

(1) Au contraire, avec une tension *progressivement croissante* ou sinusoïdale, l'intensité et l'effet Joule sont très faibles, de sorte que la supériorité du condensateur à diélectrique parfait apparaît immédiatement. Rien ne s'oppose, d'ailleurs, à ce que l'on charge un condensateur à résidus sans fuites avec un rendement aussi voisin de l'unité que l'on voudra ; il suffit pour cela de faire croître la tension d'alimentation assez lentement depuis zéro jusqu'à la valeur finale.

II. DÉFINITION DE LA CONDUCTANCE DE FUITES. — La loi de superposition a été vérifiée par M. Jacques Curie sur un grand nombre de cristaux (quartz, mica), mais s'est montrée en défaut dans quelques cas (sel gemme, alun). Il convient d'examiner si elle est applicable aux mauvais condensateurs usuels et en particulier comment il est possible de définir et de mesurer leur résistance.

Ayant d'intention d'étudier les condensateurs en courant alternatif, je ne puis adopter ici la définition de M. Jacques Curie ⁽¹⁾ qui appelle conductibilité le quotient évidemment variable de l'intensité instantanée par la tension ; il me faut déjà en courant continu séparer nettement les fuites et les résidus, puisque ces deux quantités jouent pour des courants alternatifs de fréquences différentes un rôle tout à fait distinct.

Par définition :

Si à la décharge on recueille une quantité d'électricité égale à celle que l'on a fournie à la charge, on dit que la conductance de fuites est nulle.

Si pendant une charge qui a duré un temps t , sous une tension U , on a fourni une quantité d'électricité Q et si, à la décharge on ne recueille qu'une quantité d'électricité Q' on dit que la quantité d'électricité $Q - Q'$ a été transportée par conduction et que la conductance moyenne de fuites pendant le temps t est :

$$\frac{1}{R} = \frac{Q - Q'}{Ut}.$$

Naturellement, la décharge doit être, en théorie, infiniment longue et se faire sur un court-circuit franc pour que l'on puisse recueillir toute la quantité d'électricité récupérable ; en pratique on la fait la plus longue possible, mais c'est là le point délicat des expériences. En outre, on s'arrange pour que la tension entre les armatures soit très faible, soit en employant des appareils de mesure électromagnétiques de résistance évidemment négligeable, soit en neutralisant la quantité d'électricité à mesure qu'elle se produit lorsqu'on emploie des appareils électrostatiques.

III. MESURE DE LA CONDUCTANCE DE FUITES. — D'après ce que l'on vient de lire, il faut, par définition, pour évaluer la con-

⁽¹⁾ J. CURIE. Recherches sur le pouvoir inducteur spécifique et sur la conductibilité des corps cristallisés. *Thèse*, Paris, 1888.

ductance de fuites, mesurer la charge puis la décharge du condensateur.

Si la charge est facile à évaluer au balistique, il n'en est pas de même de la décharge et la mesure de celle-ci est un problème extrêmement délicat à cause de la lenteur avec laquelle elle se produit. J. Curie, dans ses mesures, déterminait la quantité d'électricité mise en jeu dans la décharge en la compensant par celle que produisait l'action d'un poids connu sur un quartz piézo-électrique ; il reconnût ainsi que la décharge est très lente au point d'être encore appréciable au bout de quelques jours pour le quartz par exemple. Ce procédé exige de grandes précautions d'isolement, et je n'ai pas pensé qu'il fût pratique de l'appliquer couramment à des condensateurs industriels de capacité relativement considérable.

En utilisant des balistiques, j'ai dû reconnaître, après de longs essais, effectués dans diverses conditions, que les balistiques ordinaires sont incapables de mesurer, même si l'on se contente d'une grossière approximation, les décharges produites par les condensateurs usuels. La décharge étant, en effet, fort longue, on n'en enregistre qu'une partie relativement faible à la première élongation et l'on peut dans certains cas, observer, une fois que les oscillations se sont amorties, une déviation permanente notable, l'appareil se comportant alors en ampèremètre. Il convient d'insister sur ce fait parce qu'on doit voir là une cause d'insuccès pour certaines expériences faites autrefois par des auteurs qui n'avaient pas choisi convenablement leur balistique.

Il est difficile de calculer exactement l'erreur introduite par la lenteur de la décharge, mais on peut facilement se rendre compte de son existence. L'équation du mouvement est de la forme :

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} + C\theta = G \frac{dQ}{dt},$$

θ étant la déviation, Q la quantité d'électricité, K , A , C et G étant des constantes.

On en déduit immédiatement que la durée de la première élongation est différente de celle qu'on obtiendrait avec une décharge instantanée, et enfin que la grandeur de cette élongation n'est pas du tout proportionnelle à la décharge totale. A propos du tracé des cycles de viscosité, j'aurai l'occasion de donner

quelques exemples numériques pour montrer l'importance de l'erreur commise.

L'équation précédente montre que l'on peut cependant enregistrer convenablement la décharge à condition de supprimer le couple directeur. Elle devient, en effet, dans ce cas :

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d \theta}{dt} = G \frac{dQ}{dt} \quad \text{ou} \quad K \frac{d \theta}{dt} + A \theta = G Q,$$

qui, intégrée entre deux positions où le système mobile est au repos, montre que la déviation finale est proportionnelle à la décharge totale et indépendante de l'inertie du cadre.

J'ai essayé de me mettre dans ces conditions en utilisant des fluxmètres industriels système Grassot ; les résultats obtenus, quoique meilleurs, furent peu satisfaisants : les sensibilités n'étaient pas de l'ordre de grandeur désiré, le couple directeur n'était pas suffisamment annulé et, enfin, dans les modèles à pivots, les frottements quoique très réduits, étaient suffisants pour arrêter l'équipage mobile lorsque l'intensité du courant de décharge était tombée au-dessous d'une certaine valeur.

J'ai alors été conduit à transformer des balistiques de type usuel ; après un certain nombre de tâtonnements je me suis arrêté aux solutions suivantes :

A. Le cadre mobile est suspendu par un fil plat, aussi mince et aussi long que possible. Dans ces conditions, le couple de torsion est extrêmement faible. Avec du fil plat Carpentier n° 2 et une longueur de 1,50 m, j'ai obtenu des durées d'oscillations doubles de l'ordre de 5 minutes en circuit ouvert. Lorsque ce balistique était shunté par une résistance de quelques ohms seulement, l'amortissement rendait sa marche beaucoup plus lente encore. J'ai pu, avec cet appareil, enregistrer convenablement des décharges d'une durée inférieure à 10 minutes ; il m'a suffi pour le tracé des cycles de viscosité aux fréquences ordinaires.

B. Dans les expériences où les capacités employées étaient faibles, il m'était impossible de shunter aussi énergiquement le balistique, de sorte que l'action du couple de torsion était plus sensible. J'ai alors opposé à ce couple un autre de sens contraire et ne pouvant songer à produire ce dernier au moyen de petites aiguilles aimantées par suite de la proximité de dynamos, j'ai utilisé le dispositif indiqué par M. Abraham ⁽¹⁾.

(1) A. ABRAHAM. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1896, t. CXXII, p. 882.

On compense le couple de torsion à l'aide du poids du cadre.

Pour cela, on porte le centre de gravité du cadre un peu en avant de son axe de rotation à l'aide d'une petite surcharge ; on penche ensuite l'appareil en arrière, en agissant sur ses vis calantes, jusqu'à ce que la durée d'oscillation soit celle que l'on désire ; il ne faut pas aller au-delà d'une certaine limite, sans quoi l'équilibre deviendrait instable et le cadre se renverserait en arrière sous l'action de la surcharge, malgré la torsion du fil.

C. Enfin, pour les fréquences très faibles et pour les essais en courant continu, les dispositifs précédents se sont montrés insuffisants.

J'ai alors pensé, pour annuler l'action du couple de torsion pendant la décharge, à maintenir constamment l'équipage mo-

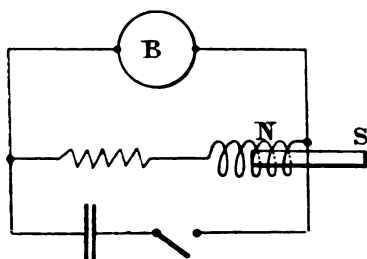


Fig. 3.

bile au zéro ; pour cela, j'ai utilisé une décharge auxiliaire, égale à celle du condensateur et dont je pouvais, à volonté, faire varier la vitesse d'écoulement.

En série avec le shunt (ou avec le balistique) on dispose (fig. 3) une bobine à l'intérieur de laquelle peut pénétrer un aimant coulissant sur une glissière en bois. Le déplacement de cet aimant provoque dans la bobine des courants induits qui se ferment dans le balistique et si celui-ci a un couple de torsion suffisamment faible et un amortissement considérable, sa déviation ne dépend que de la position de l'aimant. Il est facile d'ailleurs de le constater expérimentalement : le balistique étant au zéro, on déplace arbitrairement l'aimant à l'intérieur de la bobine pendant quelques secondes puis on le ramène à sa position primitive ; on vérifie que le spot revient aussitôt au zéro.

Une mesure se fait alors de la manière suivante :

On déplace d'abord l'aimant pour amener le spot au zéro, puis, après avoir mis momentanément le balistique en court-cir-

cuit pour l'empêcher de dévier, on retire complètement l'aimant de la bobine en le faisant coulisser sur sa glissière jusqu'à une butée qui définit sa position. Après avoir donné au shunt une valeur convenable ⁽¹⁾, on décharge le condensateur et, en même temps, on enfonce lentement l'aimant dans la bobine de manière à maintenir le spot sensiblement au zéro pendant toute la durée de la décharge. Enfin, quand celle-ci est terminée, on retire brusquement l'aimant de la bobine et le balistique indique alors une élongation proportionnelle à la quantité d'électricité débitée par le condensateur.

Cette manière de procéder ne comporte qu'une erreur relativement faible ; voici un exemple pour préciser :

. En observant d'abord le balistique au repos pendant un quart d'heure, on vérifie que son zéro est bien fixe et qu'il n'est influencé par aucune dérivation due aux fuites ⁽²⁾ ; on constate également que si, pendant une décharge, on supprime brusquement le condensateur, l'amortissement est assez considérable pour que le spot s'arrête aussitôt, de sorte que l'on peut négliger la force vive de l'équipage mobile au cours d'une décharge lente. Ces précautions prises, on décharge un condensateur, *l'aimant restant immobile* et l'on note en fonction du temps les élongations suivantes :

Temps:	0 s	10 s	20 s	30 s	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn	6 mn
Elongations en mm :	0	30	50	65	89	108	114	114	113	112

Au bout de 6 minutes on arrête la décharge et l'on voit le spot revenir lentement au zéro à la vitesse de 1 mm par minute ; il s'ensuit que les chiffres trouvés plus haut ne sont pas exacts et devraient être augmentés en première approximation de 2 mm pour le 5^e, 6 mm pour le 6^e, 10 mm pour le 7^e, 14 mm pour le 8^e, etc.

La mesure directe, même avec ce balistique dont le couple de torsion est pourtant très réduit, donne donc des résultats nettement trop petits.

La mesure est alors recommencée en compensant la charge. Après avoir laissé le condensateur en court-circuit pendant une

⁽¹⁾ La résistance du shunt, différente suivant la capacité des condensateurs étudiés ne dépassait jamais une dizaine d'ohms, de sorte que l'amortissement du balistique était très considérable.

⁽²⁾ Pour éviter les fuites, toutes les connexions avaient été faites en fil de cuivre rigide, n'ayant de contact qu'avec les bornes des appareils et ceux-ci étaient isolés sur de gros blocs de paraffine.

heure, on le charge, puis on le décharge dans les mêmes conditions, mais en manœuvrant l'aimant de manière à maintenir le spot sensiblement au zéro. Au bout de 25 minutes, alors que la décharge paraît complète, l'aimant est retiré et l'on observe une élongation de 168 mm.

Il est facile de calculer une limite supérieure de l'erreur commise. Au début de la décharge, pendant 2 secondes environ, quelques tâtonnements avaient été nécessaires ; mais, pendant cette période, la déviation était restée nettement inférieure à 10 mm ; pendant le reste de la décharge, elle n'avait pas atteint 1 mm de part et d'autre du zéro. La quantité d'électricité qui peut ne pas avoir été enregistrée du fait de l'existence d'un couple de torsion correspond donc, au grand maximum, à un nombre de millimètres égal à

$$\left[\frac{2 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times \frac{10 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} + \frac{25 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} \right] \times 4 \text{ mm}$$

quantité inférieure à 1 millimètre.

L'erreur dans cette manière de procéder dépend donc uniquement de la patience de l'opérateur qui doit prolonger pendant un temps suffisamment long la décharge et le court-circuit antérieur à la charge. On peut, enfin, remarquer que, dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes du condensateur *est rigoureusement* nulle ; de sorte que la décharge est complète et ne peut pas être influencée par les fuites du diélectrique.

La manœuvre de l'aimant est particulièrement facile lorsque le but de l'essai est la mesure d'une résistance, parce qu'il suffit alors de déterminer en une seule opération la différence entre la charge et la décharge, sans chercher à savoir suivant quelles lois celles-ci s'effectuent.

Lorsqu'on se propose, par contre, d'étudier la décharge en fonction du temps, il faudrait faire un étalonnage préalable pour connaître quelle est la quantité d'électricité qui correspond à chaque position de l'aimant. J'ai préféré alors remplacer celui-ci par une bobine sans fer fixe intérieure à l'autre et alimentée à tension variable. Le courant qui la parcourt, mesuré au milliampèremètre est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé le balistique.

IV. RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES. — Un certain nombre d'essais ont

porté sur des condensateurs à diélectrique de verre, ébonite, mica; ils ont confirmé le principe de superposition à l'approximation de mes mesures; il me paraît inutile de donner le détail de ces expériences, qui ne font que retrouver un fait déjà bien connu.

Il convient d'insister, au contraire, sur celles qui ont été faites avec de mauvais condensateurs à diélectrique plus complexe, à papier imprégné par exemple. Dans les premières mesures, je me bornais à mesurer en bloc la différence $Q - Q'$ entre la charge et la décharge. J'ai constaté dans plusieurs cas que le rapport $\frac{t}{Q - Q'}$, qui devait représenter la résistance, augmentait lentement lorsque la charge devenait plus longue; il était pourtant possible d'interpréter d'une autre manière ce résultat expérimental en admettant que la décharge était si lente qu'une partie seulement pouvait être enregistrée, malgré la longue durée de l'observation. J'ai alors pensé qu'il serait utile d'étudier séparément la charge et la décharge. Voici les résultats correspondant à une série de mesures effectuées sur des condensateurs au papier paraffiné de fabrication industrielle :

Les condensateurs étaient d'abord chargés pendant quelques minutes, puis déchargés. Pendant ce temps, on notait soigneusement les indications de l'appareil, sauf quelques instants avant la décharge, qui étaient employés pour la remise au zéro. Ce premier essai terminé, on en recommençait un autre beaucoup plus long, en se contentant le plus souvent de mesurer de temps en temps la quantité d'électricité écoulée en une minute.

CONDENSATEUR N° 3

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s. 1 mn. 2 mn. 3 mn. 4 mn. 5 mn.

75 div. 130 div. 260 div. 380 div. 500 div. 610 div.

Après 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn. 2 mn. 3 mn. 4 mn. 5 mn. 30 mn.

3,5 div. 5 div. 6,3 div. 7,5 div. 8,5 div. 18 div.

Deuxième série d'essais. — Après 1 heure de décharge, on recommence la charge.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout d'un temps de charge égal à :

50 mn.	2 h. 10	4 h.	16 h.
60 div. p. mn.	28 div. p. mn.	23 div. p. mn.	13 div. p. mn.
9 h.	24 h.	26 h.	40 h.
11 div. p. mn.	8 div. p. mn.	7 div. p. mn.	5 div. p. mn.

Après 40 heures de charge, on recommence la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.
0,3 div.	0,5 div.	1 div.

Quantité d'électricité restituée par minute au bout de :

2 h.	9 h.
0,2 div. p. mn.	0,15 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 4

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.
80 div.	130 div.	205 div.	280 div.	350 div.	420 div.

Après 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.	30 mn.
10 div.	16 div.	30 div.	57 div.

Deuxième série d'essais. — Après 1 heure de décharge, on recommence la charge.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de :

4 heures : 24 div. par mn.

Après 4 heures de charge, on recommence la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.
2 div.	3 div.	5 div.

Troisième série d'essais. — Après 10 minutes de décharge, la charge a été recommencée pendant 18 heures.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de (y compris le temps de la charge précédente) :

6 h.	8 h.	22 h.
22 div. p. mn.	19 div. p. mn.	12 div. p. mn.

Après 18 heures, de charge, le condensateur est de nouveau déchargé.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.	10 mn.	20 mn.
2 div.	3 div.	6 div.	10,5 div.	18 div.

Quantité d'électricité restituée par minute au bout de :

1 h.	5 h.	52 h.	56 h.
0,8 div. p. mn.	0,75 div. p. mn.	0,4 div. p. mn.	0,4 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 15

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.
48 div.	70 div.	115 div.	142 div.	170 div.	220 div.

Au bout de 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale restituée au bout de :

30 s.	5 mn.
21 div.	25 div.

Deuxième série d'essais. — Après 10 minutes de décharge, la charge a été recommencée.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de :

15 heures : 32 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 13

Charge au bout de 1 mn. moins décharge complète 77 div.

Courant permanent après 8 heures de charge 74 div. p. mn.

Courant permanent après 21 heures de charge 75 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 9

Charge au bout de 1 minute moins décharge complète 35 div.

Courant permanent après 8 heures de charge 31 div. p. mn.

Courant permanent après 21 heures de charge 30 div. p. mn.

V. CONCLUSION. — En possession de ces résultats, on peut comparer la conductance relative au commencement de la décharge à celle que l'on déduit de la valeur du courant au bout de plusieurs

heures de charge. En admettant que la décharge Q' a été complète, on obtient ainsi en unités arbitraires :

	Conductance moyenne au début de la charge	Conductance au bout d'un temps très long
Cond. N° 3.....	2	0,08
Cond. N° 4.....	0,86	0,2
Cond. N° 15.....	0,58	0,53
Cond. N° 13.....	1,28	1,25
Cond. N° 9.....	0,58	0,50

Ce tableau montre immédiatement qu'on peut considérer pratiquement les condensateurs N° 15, 13 et 9 comme possédant une conductance de fuites bien définie. Au contraire, pour les condensateurs N° 3 et 4, les conductances initiales et finales ne sont pas du même ordre de grandeur.

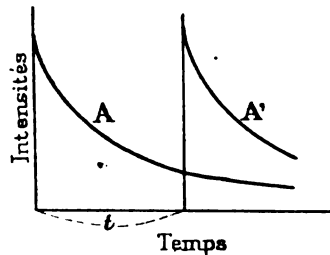


Fig. 4.

Comme je l'ai déjà dit, ce calcul suppose que la décharge Q' a été totalement enregistrée, de sorte que les résultats sont entachés d'une certaine erreur, très faible d'ailleurs. Mais ce qui ne fait aucun doute, c'est que les condensateurs N° 3 et 4 ne suivent pas la loi de superposition; on peut affirmer cela sans restriction parce que dans cette preuve interviennent non pas les quantités totales d'électricité, toujours mal connues, mais des intensités parfaitement déterminées.

La loi de superposition conduit, en effet, pour une charge pendant un temps t suivie d'une décharge indéfinie à la construction suivante (fig. 4). :

Soit A la courbe représentant le courant de charge en fonction du temps, A' une courbe égale, mais ayant subi une translation égale à t . Le courant de décharge doit être égal à la différence des ordonnées de A et de A'.

Or, on voit que cette condition est loin d'être toujours satisfaite. Pour le condensateur n° 3, par exemple, après une charge de

40 heures, la quantité d'électricité écoulée pendant la première minute de décharge devrait être égale à $130 - 5 = 125$, alors qu'elle n'est que de 0,3; pour le condensateur n° 4, après 22 heures de charge, au lieu de $130 - 12 = 118$, elle est égale à 2.

On remarque également, dans les tableaux précédents, un résultat un peu inattendu : pour les condensateurs N° 3 et 4, plus la charge est longue, sauf au début sans doute, moins les résidus sont importants; j'ai vérifié ce fait sur un certain nombre d'autres mauvais condensateurs. Il convient d'ajouter, pour être complet, que dans ces mesures le diélectrique était soumis à un champ relativement intense ; j'opérais sous 100 volts environ, et pour les condensateurs N° 3 et 4 l'épaisseur du papier paraffiné était de l'ordre de 0,01 mm, ce qui correspond à un champ de 100 000 volts par centimètre.

En résumé, pour certains condensateurs, le principe de superposition est absolument inapplicable. Pendant la charge, le courant de polarisation et le courant de conduction sont tous deux variables; une longue charge a pour effet d'éliminer à la fois la conduction de fuites et les résidus.

Tous ces faits s'expliquent aisément si l'on admet que le diélectrique contient des impuretés électrolytiques que le courant finit par déposer sur les armatures. Il n'y a pas lieu d'insister ici sur cette manière de voir; on doit retenir seulement de ce qui précède que la résistance d'un condensateur est très délicate à mesurer.

On verra dans les chapitres suivants que, en courant alternatif, certaines méthodes donnent les pertes par viscosité seule, d'autres la somme des pertes par viscosité et par conduction. Or, il vaut mieux étudier les pertes par viscosité pure qui varient évidemment suivant des lois plus simples que les pertes totales. On devra donc employer les méthodes qui donnent les pertes par viscosité de préférence aux autres, qui nécessitent une mesure de résistance en courant continu, mesure qu'il convient d'éviter le plus possible.

VI. REMARQUE. — Il n'entre pas dans mon programme de discuter à fond les méthodes ordinairement employées pour la mesure des grandes résistances; il me faut pourtant expliquer pourquoi je n'ai pas employé les plus usitées : celle de comparaison et celle de perte de tension.

A. *Méthode de comparaison.* — Le principe est celui-ci : Au moyen d'une pile puissante, on fait passer un courant à travers la

résistance à mesurer et un galvanomètre. On compare la déviation obtenue à celle que donne une résistance étalon après avoir, si c'est nécessaire, shunté le galvanomètre et abaissé la tension de la pile de charge.

Cette méthode, à cause de son peu de sensibilité, est surtout employée lorsque les condensateurs à étudier possèdent des fuites importantes; or, l'expérience montre que c'est dans le cas de ces mauvais condensateurs que l'épuration du diélectrique, sous l'influence du courant, se fait nettement sentir. On se trouve donc pris entre deux alternatives : ou bien on fait la lecture quelques instants seulement après la mise sous tension, et alors on enregistre non seulement le courant de fuites, mais encore un notable courant de polarisation; ou bien on fait la mesure au bout d'un temps très long et alors le courant de polarisation est bien négligeable, mais les effets de l'épuration se font sentir; on mesure correctement une résistance, mais ce n'est plus la résistance initiale.

B. Méthode de perte de tension. — Le condensateur à étudier est d'abord chargé par une pile de tension U_0 puis déconnecté. Il se décharge progressivement et au bout d'un temps t_1 , sa tension mesurée à l'électromètre n'est plus que U_1 . En écrivant que la diminution de tension provient uniquement du courant de fuites

$\frac{U}{R}$, on obtient :

$$\frac{U}{R} dt = - C dU, \quad R = \frac{t_1}{C \log \frac{U_0}{U_1}}.$$

Ce calcul suppose que le courant de polarisation est nul ou, ce qui revient au même, que la capacité est constante. Il est rigoureux dans le cas d'un condensateur parfait shunté par une résistance métallique. Il est, au contraire, théoriquement inapplicable aux condensateurs à résidus, la tension pouvant très bien diminuer sans qu'il y ait conductance réelle. Un condensateur à mica, par exemple, est susceptible d'une charge résiduelle qui est de l'ordre de 5 à 6 pour 100 de la charge instantanée et, d'autre part, la quantité d'électricité restituée à la décharge est égale à celle qui a été emmagasinée à la charge; il n'y a donc pas de fuites. La méthode de comparaison au bout d'un temps assez long, et celle que j'ai employée, donneront effectivement une résistance infinie; la méthode de perte de tension effectuée à l'électromètre

donnera, au contraire, une résistance d'autant plus faible, que la durée de l'expérience aura été plus courte.

On conclut de ce qui précède qu'il est impossible de mesurer la résistance d'un condensateur à résidus sans le décharger dans un balistique à période très longue ou sans mesurer sa capacité résiduelle par une méthode analogue.

CHAPITRE II

TRACÉ DU CYCLE DE VISCOSITÉ

I. HISTORIQUE. — A. C'est M. Janet ⁽¹⁾ qui, dans ses recherches sur les oscillations électriques, obtint le premier tracé d'une courbe d'hystérésis. Voici sommairement comment il opérait (fig. 5) :

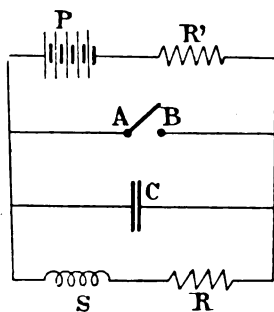


Fig. 5.

Le circuit d'une pile P comprend une résistance très grande R' , puis trois dérivation contenant : la première, un interrupteur AB normalement fermé; la deuxième, un condensateur C; la troisième, une self-inductance S en série avec une résistance ohmique R.

Un commutateur tournant permet de rompre brusquement le court-circuit AB, ce qui provoque des oscillations, puis de mesurer au bout d'un temps que l'on s'est fixé à l'avance, les tensions aux bornes de la self-inductance S et de la résistance R. Il est donc possible, en recommençant plusieurs fois l'expérience, de connaître en fonction du temps ces deux tensions; puis, en appliquant simplement les lois d'Ohm et de Kirchhoff et sans faire intervenir dans le calcul la notion de capacité, d'en déduire la tension U aux bornes du condensateur et le courant I qui le traverse; une simple intégration graphique de I en fonction du temps donne la charge Q emmagasinée.

⁽¹⁾ JANET. *Journal de Physique théorique et appliquée*, 3^e Série, tome II, 1893.

M. Janet opérait sur un condensateur à mica, avec des fréquences comprises entre 1 000 et 10 000 périodes par seconde. Il constata que le rapport $\frac{Q}{U}$ est variable pendant la durée des oscillations et que, si l'on représente la courbe des charges en fonction des tensions, on obtient non pas une droite passant par l'origine, mais une courbe plus ou moins compliquée. A tensions égales, les charges sont moins grandes pour des tensions croissantes que pour des tensions décroissantes; il n'existe donc pas dans ces conditions de capacité bien définie pour un condensateur à mica.

Mais, cette méthode, très élégante pour mettre en évidence l'existence d'une hystérésis diélectrique à des fréquences aussi élevées, ne peut être employée qu'avec des oscillations amorties. La courbe obtenue ne se ferme pas sur elle-même et ne nous renseigne pas sur la forme définitive que prendrait le cycle si le condensateur était soumis pendant un temps très long à des oscillations sinusoïdales.

B. Les expériences de Porter et Morris ⁽¹⁾ furent faites, quelque temps après, à de très basses fréquences, sur un condensateur à papier paraffiné de quelques microfarads.

Les armatures étant primitivement réunies, on les sépare, puis on établit entre elles une tension régulièrement croissante au moyen d'une dérivation à contact glissant prise sur le circuit d'une pile constante. Lorsque la tension a atteint une valeur, u , fixée à l'avance, on décharge le condensateur dans un balistique, on mesure l'impulsion, et enfin on réunit les armatures d'une manière permanente pour achever la décharge si elle n'a pas été complète. On recommence une deuxième expérience en amenant d'abord régulièrement la tension à une valeur $u' > u$, puis en la faisant diminuer jusqu'à u ; on décharge de nouveau.

Dans les deux expériences, les impulsions ont été trouvées égales, ce qui, d'après les auteurs, indique que le papier paraffiné est dénué d'hystérésis; pourtant, ces physiciens reconnaissent que le condensateur étudié possédait des résidus notables, puisque la charge qui aurait dû, à travers la résistance employée être complète à $\frac{1}{1\,000}$ près en $\frac{1}{20\,000}$ de seconde, se poursuit encore d'une manière sensible au bout de 5 secondes. Il y a là, semble-t-il, contradiction; le résultat négatif de ces expériences provient, pensons-

(1) PORTER ET MORRIS. *Proceedings of the Royal Society*, t. LVII, 1895.

nous, de la faible durée d'oscillations de leur balistique (2,5 s) : dans un temps si court, les résidus lents qui, seuls, sont différents à la montée et à la descente, n'avaient pas le temps de se décharger.

C. Ces expériences furent reprises par M. Beaulard de Lenaizan ⁽¹⁾ qui, opérant d'une manière analogue, réussit à mettre en évidence l'hystérésis du mica et de la diélectrine; ce physicien construisit les cycles correspondants, évalua l'influence de la tension et de la fréquence, mais, comme il opérait à la main pour faire varier la tension, le tracé des cycles n'était pas d'une exactitude suffisante et les résultats obtenus sont peu certains; d'une manière générale, la perte d'énergie par cycle croît un peu plus vite que le carré de la tension et varie dans le même sens que la fréquence.

D. Les expériences de M. Beaulard de Lenaizan furent continuées et complétées par l'ingénieur Mercanton ⁽²⁾. Celui-ci, pour obtenir un fonctionnement régulier, utilisa un petit moteur hydraulique qui servait à la fois à faire varier la tension suivant une loi bien linéaire et à produire en temps voulu la décharge dans le balistique. Il opéra sur un grand nombre de substances, mais trouva que la plupart, comme par exemple l'huile de vaseline, les diélectrines, le mica, la paraffine pure, les mélanges de paraffine et de charbon ou de colophane, étaient dépourvus d'hystérésis; il ne put mettre celle-ci en évidence que pour le verre, la glace, les mélanges de paraffine et de noir de fumée.

Enfin, cet auteur trouva, dans plusieurs séries de mesures, que les pertes par cycle croissaient un peu plus vite que le carré de la tension et présentaient, lorsqu'on faisait varier la période, un maximum pour une valeur de celle-ci voisine de 1 seconde. Ces expériences, très soignées, auraient donné de meilleurs résultats si l'attention de l'auteur s'était portée sur le choix de son balistique. C'est à la trop courte durée d'oscillation de son balistique qu'il faut attribuer, pensons-nous, l'étranglement que présentent, au voisinage de l'origine, les cycles obtenus.

II. CYCLE REPRESENTANT LA QUANTITE D'ÉLECTRICITÉ EMMAGASINÉE.
— En principe, pour obtenir un point du cycle de viscosité, il suffit de soumettre le condensateur étudié à une tension alternative

⁽¹⁾ BEAULARD DE LENAIZAN. *Le Journal de Physique théorique et appliquée*, 3^e Série, t. IX, 1900.

⁽²⁾ MERCANTON. *Contribution à l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques*. Thèse. Lausanne, 1902.

pendant un temps suffisamment long, puis de le décharger dans un balistique. Après avoir chaque fois ramené le condensateur dans son état primitif en lui faisant parcourir un nombre de cycles suffisant, on obtient d'autres points de la courbe en produisant de nouvelles décharges à d'autres moments de la période.

A. *Dispositif expérimental.* — Le dispositif expérimental généralement employé a été indiqué précédemment; j'y ai apporté quelques perfectionnements. En particulier, la tension utilisée a été sinusoïdale au lieu d'être linéaire. J'ai rendu plus précis le fonctionnement du commutateur de charge et de décharge. Enfin,

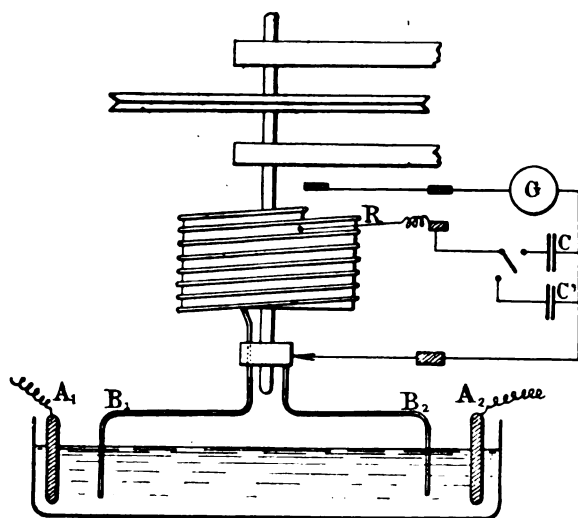


Fig. 6.

la tension au moment de la commutation a été déduite de la charge que possédait à cet instant un condensateur parfait; les essais préliminaires m'avaient, en effet, montré que l'on obtenait des résultats médiocres en mesurant à l'électromètre, une fois pour toutes, à l'arrêt, la tension correspondant à chaque position du commutateur, soit par suite des variations locales de conductibilité du liquide, soit à cause de la polarisation des électrodes mobiles.

Voici comment j'opérais pour décharger le condensateur en un point précis de la période et mesurer la tension correspondante.

Une des électrodes B_2 (fig. 6), reste toujours en communication avec l'une des bornes du condensateur C et du balistique G. L'autre aboutit à un gros cylindre fileté calé sur l'arbre et sur

lequel glisse l'extrémité d'un ressort R relié à la borne libre du condensateur. Ce ressort guidé par les filets fait parcourir quelques cycles au condensateur tant qu'il reste en contact avec le cylindre, puis brusquement à la fin du filetage produit la décharge dans le balistique. Pour connaître la valeur de la tension au moment où cesse la charge, il suffit de remplacer le condensateur étudié par un condensateur parfait ; n'ayant pas à ma disposition de condensateur à air d'une capacité suffisante, je l'ai remplacé par des condensateurs au mica ou à la paraffine dure exempts de viscosité. En portant en abscisses l'élongation relative à ces derniers et en ordonnées celles que donne le condensateur étudié, on obtient ainsi un premier point de la courbe de viscosité. Pour en avoir d'autres, il suffit de faire tourner légèrement soit le support du ressort R, soit la cuve à eau acidulée.

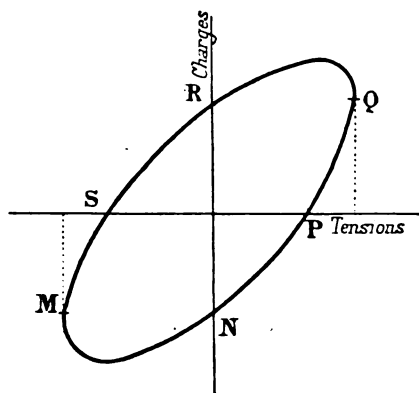


Fig. 7.

B. Inversion du courant de décharge. — J'ai déjà insisté sur les difficultés que l'on rencontre pour mesurer la charge d'un condensateur imparfait. Pendant le temps qui sépare le commencement de la décharge du moment du maximum de la première élongation, non seulement la décharge n'est pas complète, mais encore la quantité d'électricité écoulée n'est pas proportionnelle à cette élongation, la théorie élémentaire du balistique étant alors en défaut. Ainsi, pour un balistique choisi sans précautions, l'observation de la première élongation ne peut fournir aucun renseignement précis.

Les mesures sont surtout délicates à interpréter lorsqu'on essaie de déterminer les portions NPQ et RSM du cycle (fig. 7), cor-

respondant à des champs croissants en valeur absolue. Dans ces régions, la décharge change de sens au bout d'un certain temps; il en résulte le plus souvent que le déplacement du spot diminue bien avant le quart de la durée d'une oscillation normale; un observateur non averti peut confondre ces deux phénomènes.

Cette inversion du courant de décharge n'a rien qui doive surprendre, mais elle me paraît intéressante à signaler parce que jusqu'ici on ne l'avait observée que pour des condensateurs soumis à des tensions continues de sens inverse. Comme je l'ai dit, elle existe également pour des tensions sinusoïdales, mais seulement dans le cas où au moment de la décharge la tension a changé de signe depuis moins d'un quart de période; elle ne se produit jamais pour les régions QR et MN qui correspondent à des champs décroissants en valeur absolue.

Pour étudier complètement ce phénomène, il m'a paru utile de mesurer la quantité d'électricité libérée par la décharge pour différentes valeurs de la tension instantanée et pendant des temps variables. J'ai utilisé pour cela un balistique à longue période, muni d'une bobine compensatrice; la quantité d'électricité mise en jeu à un instant quelconque était proportionnelle à l'intensité du courant compensateur, et était relevée 10 s, 20 s, 30 s, 1 mn, 2 mn, 3 mn, après le commencement de la décharge. Dans une dernière série de mesures, un commutateur automatique a été placé sur l'arbre pour limiter la durée de décharge à une seconde; je ne faisais alors pas usage de la bobine compensatrice.

Voici les résultats obtenus (fig. 8) pour un condensateur au papier paraffiné, à la fréquence de 0,33 p.s. Les tensions sont en volts, les charges en microcoulombs.

CONDENSATEUR N° 4. TENSION MAXIMUM. 62 VOLTS							
Tension		+ 8 croît	+ 11 croît	+ 58 croît	+ 52 décr.	+ 33 décr.	+ 11 décr.
Décharge en	1 s	— 7	+ 9	+ 20	+ 27	+ 22	+ 11
»	en 10 s	— 18	+ 12	+ 32	+ 45	+ 44	+ 31
»	en 20 s	— 34	+ 6	+ 38	+ 61	+ 65	+ 50
»	en 30 s	— 48	+ 3	+ 41	+ 72	+ 77	+ 66
»	en 1 mn	— 67	— 3	+ 44	+ 88	+ 101	+ 87
»	en 2 mn	— 87	— 11	+ 43	+ 100	+ 115	+ 108

C. Déformation du cycle due au mauvais choix du balistique.

— 1° *Balistique dont la durée d'oscillation est insuffisante.* — En possession des résultats précédents, il est possible d'examiner d'une manière plus précise ce qui se passe lorsque l'on utilise un

balistique dont la durée d'oscillation est faible, de quelques secondes par exemple :

Pour un point A à gauche de O la décharge brusque correspondant au pouvoir inducteur spécifique instantané donne une impulsion qui fait dévier le balistique du côté négatif, à gauche pour fixer les idées ; pendant ce déplacement la décharge se con-

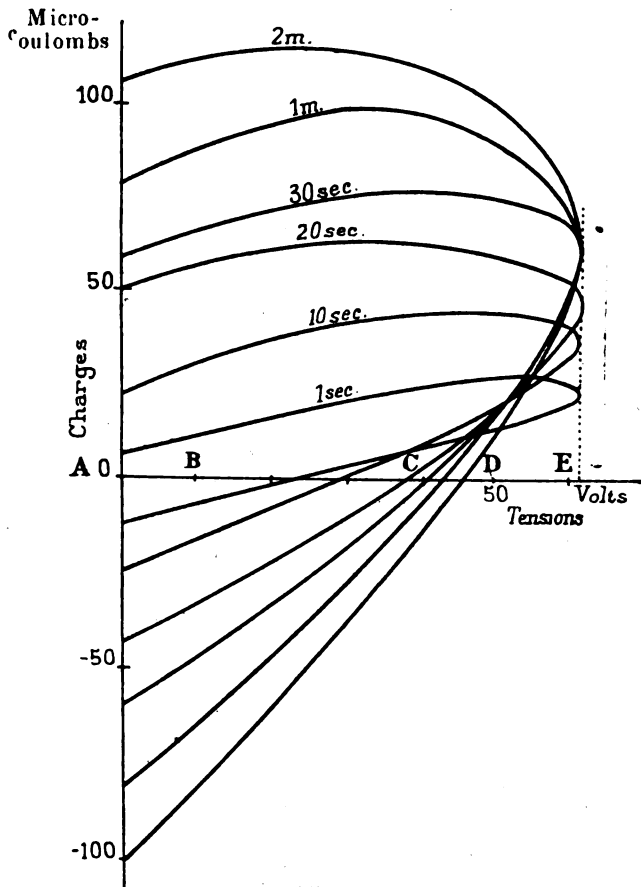


Fig. 8.

tinue et cette action supplémentaire contribue à augmenter la déviation : il arrive pourtant un moment où la torsion du fil devient prépondérante et fait revenir l'équipage mobile vers la droite.

On peut considérer ensuite un point tel que B à droite, mais près du point O. La décharge instantanée donne dans ces conditions une première impulsion vers la droite, mais celle-ci est si faible et si courte qu'elle passe inaperçue ; aussitôt après, en

effet, les résidus se déchargent, poussant l'aiguille vers la gauche, et c'est cette deuxième élongation, celle qui est produite par les résidus, qu'observe l'opérateur.

Au point C, un peu plus loin, la décharge instantanée a augmenté ; d'autre part les résidus les plus rapides sont devenus positifs, de sorte que l'impulsion vers la droite sera sensible. L'observateur verra donc nettement deux élongations, l'une vers la droite, l'autre vers la gauche ; *il ne saura d'ailleurs pas choisir entre les deux.*

Au point D l'élongation vers la droite sera considérable ; son amplitude sera évidemment réduite par l'action des résidus lents qui sont encore négatifs ; pour la même raison sa durée sera probablement inférieure au quart de la période d'oscillation en circuit ouvert. L'observateur n'ayant aucune raison de soupçonner ces anomalies enregistrera cette élongation comme représentant la décharge totale.

Enfin, au point E les résidus rapides sont positifs et intenses ; les résidus lents qui ont pris naissance un quart de période avant, au moment où la tension était sensiblement nulle, ont fort peu d'influence. La décharge s'effectue toujours dans le même sens, le balistique n'en enregistre évidemment qu'une partie assez réduite.

Ainsi lorsque le balistique utilisé a une période d'oscillation insuffisante, une notable partie du résidu n'est pas enregistrée, la surface du cycle de viscosité est considérablement réduite et sa forme même peut être profondément modifiée. On a vu, en effet, que, au voisinage du point B, l'opérateur observe la deuxième élongation, celle qui se produit vers la gauche, tandis qu'au point D, c'est la première, celle qui se produit vers la droite, qu'il enregistre. Suivant le moment où il passe de l'une à l'autre, il déforme plus ou moins la courbe. Le plus souvent, l'observateur ne déterminant le cycle que par quelques points, ne tombe sur aucun point analogue à C ; il joint d'un trait continu les points du cycle correspondant à B et D, de sorte que la figure obtenue présente au voisinage du centre un étranglement (fig. 9). ⁽¹⁾

Pour préciser, j'ai relevé soigneusement dans cette région de la courbe, les deux premières élongations de sens contraire relatives à un condensateur à papier paraffiné. Voici les résultats obtenus :

(¹) En particulier il faut chercher là l'explication de l'étranglement de certains cycles que Mercanton constatait sans pouvoir en donner la raison.

Condensateur N° 21. Tension maximum, 75 volts.

Fréquence : 1 période en 3 secondes.

Durée d'oscillation double du balistique : 4 secondes.

Tension (volts)	1 ^{re} elongation (mm)	2 ^{me} elongation (mm)
— 18	»	— 19
— 5	»	— 14
8	0,5	— 13
15	1	— 11
23	2	— 10
29	3	— 9
36	4	— 8
44	6	— 7
54	8	— 5
60	10	— 2
60	15	0
75	25	»

2° *Fluxmètre à pivots.* — Le couple de torsion est, dans cet instrument, pratiquement négligeable, mais les frottements ne sont

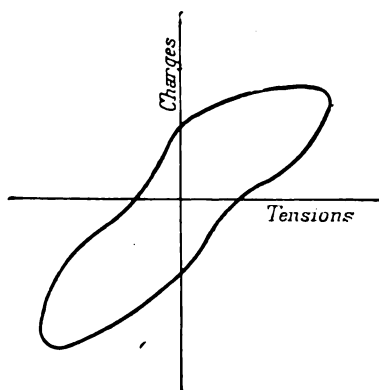


Fig. 9.

pas absolument nuls ; lorsque le couple électromagnétique devient inférieur au couple de frottement, l'équipage mobile s'arrête. Il s'ensuit que le cycle obtenu est surtout déformé aux points pour lesquels la décharge est la plus lente. En particulier, lorsqu'il y a inversion de courant, l'aiguille reste souvent calée lorsque le courant s'annule au lieu de repartir en sens inverse ; le cycle a tendance à devenir rectiligne dans les régions où la tension croît en valeur absolue.

3° *Comparaison expérimentale.* — Pour mettre en évidence l'influence du balistique, j'ai comparé (fig. 10) les cycles obtenus pour un même condensateur à papier paraffiné dans les cas suivants :

Décharge dans un balistique dont la période d'oscillation double était 4 secondes.

Décharge dans un balistique à longue période, muni d'une bobine de compensation.

Décharge dans un fluxmètre.

Décharge d'un condensateur au mica en série avec le condensateur à étudier (méthode dont je m'occuperai plus loin).

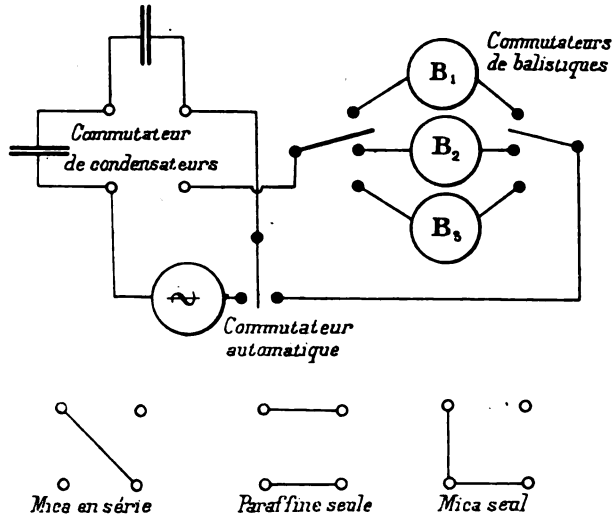


Fig. 10.

Voici les résultats obtenus, les élongations des trois appareils étant ramenés à la même échelle (fig. 11) :

Condensateur N° 18. Tension maximum, 66 volts.

Fréquence : 1 période en 3 secondes.

Tension instantanée (Décharge Mica)	Quantité d'électricité libérée (microcoulombs)		
	Balistique à courte période (t)	Fluxmètre	Balistique compensé
12 croît	1	— 10	— 36
35 croît	3	0	— 24
60 croît	8	14	3
63 décroît	16	23	33
27 décroît	12	26	42
2 décroît	9	16	41

D. Influence des fuites. — Il convient enfin de se demander quelle peut être dans cette méthode l'action des fuites ; l'influence de ces dernières peut s'exercer soit entre la charge et la décharge, soit pendant la décharge elle-même.

1° Par suite de l'inertie des pièces en mouvement, la commu-

(¹) La première, élongation seule a été prise, même quand elle n'était pas la plus importante.

tation ne peut être instantanée ; pendant qu'elle s'effectue, le condensateur reste isolé et la *tension* entre ses armatures décroît pour deux raisons : les fuites, la viscosité. La deuxième de ces causes n'a aucune influence sur la *quantité* d'électricité emmagasinée et ne peut modifier que la vitesse de décharge ; la première, au contraire, prélève sur les armatures une partie de la charge qui ne sera plus enregistrée au balistique.

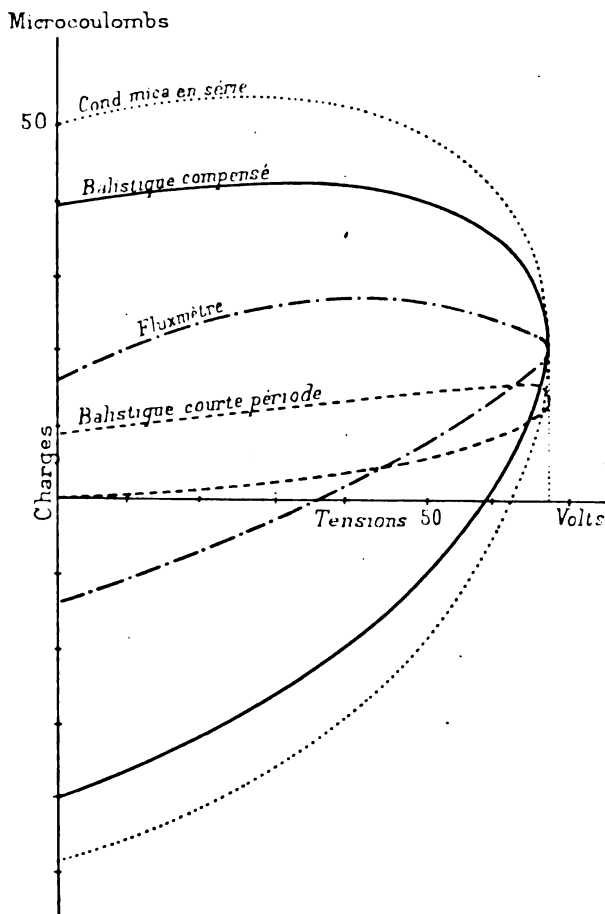


Fig. 11.

Afin de connaître l'influence de cette cause d'erreur, j'ai mesuré, au cours de divers essais, la durée de cette commutation ; elle a toujours été nettement inférieure à $\frac{1}{100}$ de seconde ; il est facile de se rendre compte que, dans ces conditions, l'erreur due aux fuites est négligeable. En nous plaçant dans le cas tout à fait défavorable d'un condensateur de $1 \mu F$ qui posséderait une résis-

tance de fuites équivalente à 1 mégohm, la charge perdue pendant $\frac{1}{100}$ de seconde ne serait que le $\frac{1}{100}$ de la charge totale, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

J'ai voulu préciser la conclusion précédente en construisant certains cycles pour des durées de commutation relativement grandes. Pour la plupart des condensateurs, on ne constate rien d'anormal quand cette durée est inférieure à 1 seconde ; pour quelques-uns, cependant, particulièrement mauvais, l'erreur était déjà sensible, quoique faible pour $\frac{1}{10}$ de seconde.

L'influence de la lenteur de la commutation n'est pas identique pour tous les points du cycle. Elle est proportionnellement plus grande pour les tensions voisines de la tension maximum ; il revient au même de dire qu'elle affecte beaucoup plus la charge instantanée que les résidus. A mesure que la durée de la commutation augmente, les points d'intersection du cycle avec l'axe des tensions s'éloignent du centre, les points d'intersection avec l'axe des charges demeurent sensiblement immobiles.

2° Pendant la décharge, si le balistique a une énorme résistance, la tension aux bornes du condensateur n'est pas nulle, de sorte qu'une partie de la charge passe d'une armature à l'autre à travers les fuites du diélectrique. Si, au contraire, on utilise un balistique muni d'une bobine de compensation, puisque pendant toute la durée de la décharge sa déviation est nulle, c'est que la tension aux bornes de son shunt est rigoureusement nulle. Le condensateur se décharge donc dans un court-circuit absolument franc, de sorte que l'influence des fuites est nulle.

E. *Remarque sur l'emploi du mica comme étalon.* — Tout ce qui précède suppose que le condensateur au mica est parfait.

Aux fréquences téléphoniques et en haute fréquence, la comparaison directe de condensateurs à air et de petits condensateurs au mica montre que les pertes dans ces derniers sont très faibles.

Mais à très basse fréquence, il pouvait en être autrement, et il était nécessaire de vérifier expérimentalement que l'emploi du mica comme étalon n'introduisait dans les mesures qu'une erreur négligeable ; je ne pouvais évidemment pas le comparer à un condensateur à air, mais il m'était toujours possible de mesurer directement la tension au voltmètre.

Je me suis borné, pour plus de sensibilité, à déterminer l'or-

donnée à l'origine du cycle. Pour cela, le commutateur automatique était d'abord amené exactement au point où se produisait la rupture ; ensuite, je faisais tourner lentement, à la main, la cuve à eau acidulée jusqu'à ce que la tension entre les électrodes mobiles soit nulle, ce que je constatais au moyen du galvanomètre fonctionnant en voltmètre. Le moteur était enfin mis en marche, à une vitesse très lente ; quand la commutation automatique se produisait, j'enregistrais au balistique la décharge correspondant à une tension nulle.

Pour les très faibles vitesses, j'obtenais quelques résidus, mais dans tous les cas, l'ordonnée à l'origine était inférieure au centième de l'ordonnée maximum, ce qui justifie l'emploi du condensateur au mica comme étalon.

III. CYCLE REPRESENTANT LA QUANTITE D'ÉLECTRICITÉ ABSORBÉE. — Les cycles précédents étaient obtenus en portant en ordonnées les quantités d'électricité *emmagasinées* par le condensateur à la charge et *restituées* à la décharge.

On peut construire d'autres cycles qui ne représentent plus la viscosité, mais qui n'en sont pas moins très intéressants ; on les obtient en portant en ordonnées les quantités d'électricité *absorbées* à la charge, qu'elles soient ou non complètement restituées à la décharge.

Ces deux cycles sont forcément identiques, lorsque les fuites sont nulles ; lorsqu'elles ne le sont pas, on peut passer de l'un à l'autre si l'on a mesuré la résistance en courant continu.

La quantité d'électricité absorbée peut être mesurée expérimentalement par l'une des méthodes suivantes :

Décharge d'un condensateur parfait en série avec le condensateur étudié.

Oscillographe.

Contacts tournants.

A. *Décharge d'un condensateur parfait en série avec le condensateur étudié.* — J'ai montré précédemment que la lenteur de la décharge rend les lectures au balistique longues et pénibles.

Il est donc intéressant de pouvoir remplacer la décharge *lente* du condensateur imparfait par la décharge *rapide* d'un condensateur parfait qui possède la même charge ; on arrive facilement à ce résultat en chargeant le condensateur étudié en série avec un condensateur au mica et en déchargeant ce dernier dans le balistique.

Si la capacité du condensateur au mica est grande par rapport à celle de l'autre condensateur, on peut admettre que la tension aux bornes de ce dernier est égale à la tension totale ; sinon, on la calcule par différence. Voici comment on opère :

On charge d'abord les deux condensateurs en série et l'on décharge le condensateur à mica dans le balistique ; l'élongation α ainsi obtenue est proportionnelle à la fois à la tension entre les armatures du condensateur parfait et à la charge commune. On court-circuite ensuite le condensateur imparfait, de manière à charger le condensateur au mica seul, puis on le décharge dans le balistique ; l'élongation β obtenue mesure la tension totale. La tension aux bornes du condensateur imparfait étant représentée par $\beta - \alpha$ il suffit pour obtenir le cycle de viscosité à une échelle arbitraire de porter en abscisses $\beta - \alpha$ et en ordonnées α .

Dans cette méthode, il n'y a plus à craindre que la durée d'oscillation du balistique soit trop faible ; quelle que soit celle-ci, les résultats trouvés sont identiques. Mais en plus du courant de polarisation, on enregistre les fuites. Il ne faut pourtant pas exagérer l'importance de ces dernières ; sauf pour des fréquences très basses, leur influence est faible. J'ai comparé précédemment les résultats obtenus par cette méthode et par la décharge directe du condensateur imparfait ; les cycles ne sont pas très différents ; ils sont beaucoup moins déformés que ceux que l'on obtient avec un balistique de période trop courte.

B. Emploi de l'oscillographe. — Au lieu de mesurer les charges, l'oscillographe indique les intensités ; cela revient évidemment au même. Dans le cas le plus général pour construire un cycle avec cet appareil, on enregistre sur un même graphique les courants qui traversent le condensateur à étudier et une résistance connue. De la première par une intégration graphique on déduit aisément à chaque instant de la période la charge absorbée par le condensateur ; de la deuxième on déduit immédiatement la tension correspondante et l'on peut tracer le cycle. On peut évidemment remplacer la résistance étalon par un condensateur parfait, mais cela conduit à une deuxième intégration.

Dans le cas particulier où la tension est sinusoïdale, et dans ce cas seulement, on peut se dispenser de ces intégrations longues et peu précises. L'intensité est évidemment sinusoïdale dans le condensateur parfait ; l'expérience montre qu'elle l'est également dans le condensateur à étudier. Il suffit donc pour obtenir le cy-

cle de porter en abscisses l'intensité du courant dans le condensateur parfait, et en ordonnées l'intensité dans le condensateur à étudier.

L'emploi d'un oscillographe n'est pas toujours possible. En principe, cet appareil possède, en effet, un amortissement très fort et un moment d'inertie faible. Dans ces conditions, sa sensibilité est bien inférieure à celle des galvanomètres ordinaires, de sorte qu'on ne peut que difficilement enregistrer les courants de charge des condensateurs.

L'oscillographe est surtout utile à basse fréquence, car on peut alors donner à son équipement mobile un nombre de spires suffisant sans que sa durée d'oscillation soit comparable à la période de la tension d'alimentation. Naturellement, la résistance de l'appareil doit rester suffisamment faible pour ne pas introduire de déphasage supplémentaire.

J'ai employé la méthode oscillographique à très basse fréquence ; dans ces conditions, je pouvais utiliser un galvanomètre de type courant.

La durée d'oscillation du galvanomètre pouvait être :

1° Relativement très courte, et alors la déviation était proportionnelle à l'intensité ;

2° Ou relativement très longue, et dans ce cas l'appareil fonctionnant en fluxmètre, la déviation était proportionnelle à la charge.

Par contre, si la durée d'oscillation du galvanomètre utilisé avait été du même ordre de grandeur que la période du courant d'alimentation, il se serait produit des battements, la déviation n'aurait plus été sinusoïdale et aucune mesure n'aurait été possible.

Les choix entre les deux solutions précédentes dépend surtout des appareils dont on dispose, et des fréquences utilisées ; il est également influencé par la qualité des condensateurs à essayer. Pour de bons condensateurs, la déviation est, en effet, en raison inverse de la fréquence dans le premier cas, et constante dans le deuxième ; pour de mauvais condensateurs, elle est presque constante dans le premier cas, et sensiblement proportionnelle à la fréquence dans le deuxième. Il faut évidemment tenir compte de ce fait si l'on veut avoir pour différentes fréquences des déviations convenables.

J'ai observé directement la déviation du galvanomètre pour les

fréquences extrêmement basses ; dans les autres cas, j'ai employé une méthode de zéro. Le réglage et l'étalonnage étaient faits sur une résistance de 200 000 ohms.

C. *Emploi de contacts tournants.* — Lorsque l'oscillographe lui-même ne peut être employé, on lui substitue des contacts tournants. Mais ces appareils ne permettent de faire de bonnes mesures que si leur fonctionnement mécanique est parfait ; or, il en est rarement ainsi ; il se produit, au moment où le contact commence, par suite de la largeur des balais, des irrégularités de la partie fixe ou des vibrations, une courte période d'indétermination qui fait que le contact n'a pas toujours la durée voulue ; on ne peut remédier à cet inconvénient qu'en donnant au contact une durée suffisamment longue devant laquelle celle de l'établissement du contact est négligeable ou encore en adoptant un

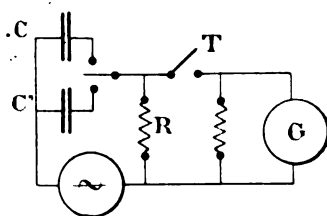


Fig. 12.

appareil de mesure dont les indications sont indépendantes de la durée du contact.

1° Pour ces raisons, je n'ai pu enregistrer correctement, au moyen d'un galvanomètre et d'un contact instantané, l'intensité du courant dans le condensateur ; la déviation, qui était proportionnelle à la durée du contact était trop fortement influencée par ses variations. En opérant sur la *quantité d'électricité*, j'ai obtenu de meilleurs résultats.

Le courant de l'alternateur (fig. 12) traverse successivement le condensateur C à étudier et une faible résistance R. Le contact tournant T met en dérivation sur R *pendant une demi-période* le galvanomètre G convenablement shunté. Il est facile de voir que celui-ci prend une déviation permanente proportionnelle à la quantité d'électricité qui a passé dans le condensateur à un certain moment qui dépend de la position du balai. En faisant varier celle-ci et en comparant chaque fois la déviation à celle que donne dans les mêmes conditions un condensateur parfait, on

peut facilement tracer le cycle. Cette méthode est bien plus sensible que la décharge directe au balistique ; la quantité d'électricité qui passe dans l'appareil de mesure est bien plus importante, d'autant plus que la fréquence est elle-même plus élevée.

2° On peut utiliser également une méthode de contact instantanée, mais alors il faut remplacer le galvanomètre par un appareil dont les indications sont indépendantes de la durée du contact, un électromètre par exemple (fig. 13).

On charge en série le condensateur à étudier et un condensateur parfait. Un contact tournant A met en communication avec

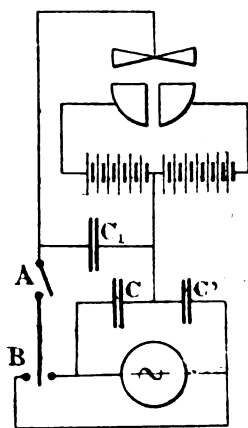


Fig. 13.

un électromètre pendant un temps très court, toujours au même instant de la période l'un quelconque des condensateurs, suivant la position d'un commutateur à main B ; on mesure ainsi tantôt la tension aux bornes du condensateur à étudier, tantôt celle qui existe aux bornes du condensateur parfait. Cette dernière étant proportionnelle à la charge commune, il suffit, pour avoir un point de la courbe, de lire les indications de l'électromètre avant, et après avoir manœuvré le commutateur à main ; pour avoir d'autres points de la courbe on agit sur la position du contact tournant. Si l'on opère à une fréquence relativement faible, il est quelquefois utile d'augmenter la capacité de l'aiguille par un petit condensateur auxiliaire C_1 pour que la déviation reste constante pendant la durée d'un tour, malgré de petits défauts d'isolement.

La sensibilité de cette méthode est théoriquement sans limites, puisque c'est simplement le rapport de deux tensions que l'on mesure ; il suffit de prendre une capacité étalon suffisamment petite, ce qui est toujours possible. Il faut pourtant faire attention que, pour des capacités très petites, de l'ordre du millième de microfarad, la capacité de l'alternateur, des accumulateurs et des connexions par rapport à la terre peut fausser les résultats ; il faut prendre quelques précautions et en particulier il est préférable d'adopter pour l'électromètre le montage idios-tatique.

Cette méthode m'a rendu certains services à tension élevée ; le claquage accidentel des condensateurs étudiés ramenait simplement l'appareil au zéro ; avec les autres méthodes, il aurait causé d'importants dégâts.

3. Les méthodes de l'oscillographe et des contacts tournants doivent donner des résultats identiques à ceux que l'on obtient en déchargeant dans un balistique un condensateur parfait en série avec le condensateur à étudier ; elles sont influencées de la même manière par les fuites. Mais la méthode du balistique présente un inconvénient qui peut devenir grave : elle soumet le condensateur étudié à un régime discontinu composé de cycles sous tension sinusoïdale séparés par des intervalles de court-circuit ; on peut craindre qu'au moment de la décharge, la courbe de viscosité n'ait pas encore atteint sa forme définitive.

IV. UTILISATION DES CYCLES. — On a déjà vu comment on pouvait déterminer le cycle de viscosité ; il reste maintenant à en déduire la capacité et la puissance absorbée.

Avant d'aller plus loin, il est indispensable pour pouvoir parler d'une manière précise, de définir ce que l'on entend par capacité et par pertes.

A. *Capacité*. — La capacité d'un condensateur parfait ne peut se définir que d'une seule manière ; c'est le rapport constant qui existe entre sa charge et la tension à ses bornes. Pour un condensateur imparfait sans fuites, au contraire, on peut distinguer plusieurs sortes de capacités (fig. 14).

1° Un condensateur imparfait mis sous une tension constante U pendant un temps extrêmement court, prend une charge bien définie Q_1 . On peut donner au rapport $\frac{Q_1}{U}$ le nom de « capacité ins-

tantanée » ⁽¹⁾. On arriverait à la même définition en considérant la charge libérée pendant une décharge extrêmement courte.

Le même condensateur mis sous une tension constante U pendant un temps extrêmement long emmagasine une charge Q_2 ; le rapport $C = \frac{Q_2}{U}$ est la « capacité maximum ».

2° Enfin, ce condensateur soumis à une tension alternative, sinusoïdale, par exemple, aura emmagasiné à un instant quelconque t une charge q qui ne dépendra pas uniquement de la tension correspondante u . La quantité $\frac{q}{u}$ que l'on pourrait appeler « capacité à l'instant t » prend toutes les valeurs, depuis $-\infty$ jusqu'à $+\infty$, suivant les valeurs de t ; elle n'est pas une caractéristique du condensateur, et l'on est amené en courant alternatif à envisager d'autres définitions.

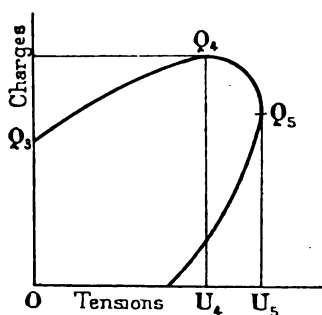


Fig. 14.

On peut à volonté introduire dans celles-ci les coordonnées des points remarquables de la courbe de viscosité : Q_3 charge correspondant à une tension nulle, Q_4 charge maximum, et U_4 tension correspondante, enfin U_5 tension maximum et Q_5 charge correspondante.

Mais une bonne définition doit remplir certaines conditions :

La capacité d'un condensateur imparfait doit : 1° être définie sans ambiguïté ; 2° pouvoir être mesurée d'une manière précise ;

⁽¹⁾ Le mot « instantané » est pris ici dans un sens tout relatif. La théorie électromagnétique de la lumière montre, sans faire aucune hypothèse sur la nature des éléments actifs à l'intérieur du diélectrique, que, pour une même fréquence, le pouvoir inducteur est égal au carré de l'indice de réfraction. On en conclut que, pour des fréquences de plus en plus faibles, le premier ne tend pas vers une limite. Il n'existe pas plus de pouvoir inducteur instantané que d'indice instantané.

3° comprendre comme cas particulier celle d'un condensateur parfait sur la définition de laquelle tout le monde est d'accord.

La première condition oblige à employer comme appareil de mesure fondamental le balistique ; c'est, en effet, la seule méthode dont les résultats peuvent être interprétés sans aucune hypothèse sur la constitution intime des diélectriques, et sont valables même si ceux-ci possèdent des fuites.

La deuxième condition oblige à éliminer de la définition les valeurs Q_3 et U_1 qui sont très mal connues expérimentalement.

Enfin, la troisième condition empêche de se servir de Q_3 qui devient nul dans le cas d'un condensateur parfait.

Je m'arrêterai donc à la définition suivante :

La capacité en courant alternatif est le rapport $\frac{Q_1}{U_3}$ de la charge maximum à la tension maximum.

Accessoirement je considérerai les rapports $\frac{Q_2}{U_3}$ et $\frac{Q_3}{U_3}$ qui sont les composantes actives et réactives de la capacité ainsi définie. On verra, d'ailleurs, que *moyennant certaines hypothèses* d'autres méthodes de mesure (pont, etc.) donnent le rapport $\frac{Q_1}{U_1}$.

B. *Pertes.* — Il faut également préciser la définition des pertes.

1° Dans un condensateur *parfait avec fuites*, le courant de capacité se compose avec le courant de conduction ; la résultante est déphasée par rapport à la tension. On doit considérer un « déphasage dû aux fuites ».

2° Dans un condensateur *imparfait sans fuites*, il se produit des pertes par viscosité, et l'intensité n'est plus en quadrature avec la tension. On a à considérer un autre « déphasage dû à la viscosité. »

3° Dans un condensateur *imparfait avec fuites*, ces deux sortes de pertes coexistent. On doit donc considérer un « déphasage total ».

Il faut bien faire attention quand on compare les résultats de plusieurs méthodes, que les unes nous donnent le déphasage total, les autres seulement le déphasage dû à la viscosité.

Après avoir défini ainsi les déphasages φ du courant sur la tension, on peut considérer les déphasages α de la quantité d'électricité sur la tension ; ces angles α auxquels on donne le nom d'angles de pertes sont complémentaires des angles φ .

C. *Décharge directe au balistique.* — Un condensateur imparfait sans fuites traversé par un courant sinusoïdal, dont l'intensité efficace est I ampères, déphasé d'un angle φ sur une tension sinusoïdale dont la valeur efficace est U volts, absorbe une puissance de $UI \cos \varphi$ watts.

Je puis introduire dans cette expression la charge efficace.

Comme l'intensité instantanée est la dérivée de la charge instantanée, le rapport entre leurs valeurs efficaces est égal à la pulsation ω .

$$I = Q \omega$$

Au lieu du déphasage φ de l'intensité, je fais apparaître le déphasage α de la charge sur la tension. La puissance absorbée devient :

$$U Q \omega \sin \alpha.$$

En mettant en évidence la capacité C définie précédemment l'expression de la puissance devient :

$$U^2 C \omega \sin \alpha \text{ watts.}$$

Enfin, les pertes que l'on aurait obtenues en opérant sous une tension efficace de 1 volt ont pour valeur :

$$P_a = \omega C \sin \alpha \text{ watts.}$$

A côté de cette puissance active P_a transformée en chaleur, on peut considérer la puissance réactive P_r restituée par le condensateur ; on obtient de la même manière :

$$P_r = \omega C \cos \alpha \text{ watts.}$$

Les valeurs de $C \sin \alpha$ et de $C \cos \alpha$ se déduisent immédiatement du tracé du cycle. Elles sont égales à :

$$C \sin \alpha = \frac{Q_1}{U_1}, \quad C \cos \alpha = \frac{Q_2}{U_2}.$$

Le calcul précédent a été fait dans le cas où la conductance de fuites du condensateur est nulle. S'il n'en est pas ainsi, les résultats sont quand même entièrement valables, le balistique n'étant pas influencé par les fuites. La puissance *perdue par viscosité* est encore donnée par la même formule.

D. *Décharge d'un condensateur parfait en série. Oscillographe. Contact tournant.* — La méthode précédente est la seule qui puisse donner d'une manière sûre les pertes *par viscosité* et la capacité telle que je l'ai définie. Toutes les autres nécessitent des hypothèses supplémentaires. Dans celle-là, nous avons seulement supposé que le courant sous tension sinusoïdale restait sinu-

soïdal ; dans celles-ci, nous serons obligés de faire une correction plus ou moins délicate relative aux fuites.

La décharge dans un balistique d'un condensateur parfait en série avec le condensateur à étudier, l'oscillographe, les contacts tournants et toutes les méthodes qui en dérivent ne permettent, en effet, de mesurer que la charge qui est absorbée par le condensateur et non celle qui est récupérable. Une conséquence immédiate est qu'elles font connaître la perte d'énergie totale, tant par effet Joule proprement dit que par viscosité. On peut bien, il est vrai, déduire l'effet Joule de la résistance mesurée en courant continu, mais j'ai montré combien il faut être prudent dans ces mesures et quelles incertitudes on obtient sur le résultat final.

En outre, si ces méthodes font connaître d'une manière très sa-

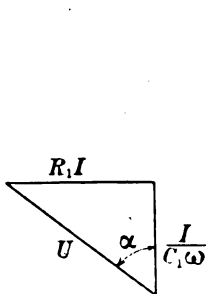


Fig. 15.

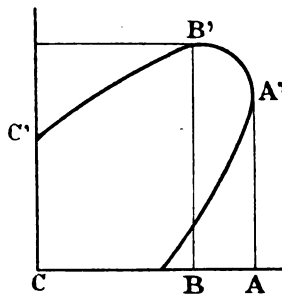


Fig. 16.

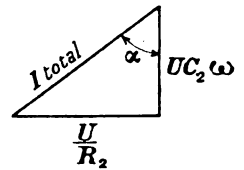


Fig. 17.

tisfaisante la perte totale, quantité souvent intéressante, elles renseignent beaucoup moins bien sur la capacité. On peut montrer, en effet, qu'un cycle donné n'est pas caractéristique d'un condensateur possédant à la fois de la viscosité et des fuites.

Ce que l'on connaît sans ambiguïté, c'est, d'une part, la puissance active proportionnelle à $C \sin \alpha$: d'autre part, la puissance réactive proportionnelle à $C \cos \alpha$. Or, cette dernière ne permet de calculer la capacité que si l'on connaît sous quelle tension cette puissance est emmagasinée, ce qui n'est pas le cas. On peut le montrer par un exemple simple.

On associe d'abord en série (fig. 15) un condensateur parfait C_1 et une résistance R_1 . Cet ensemble, dans des conditions de fréquence et de tension bien déterminées, donne un certain cycle $A'B'C'$ (fig. 16) et l'angle de perte est donné par la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = R_1 C_1 \omega.$$

Or, quand la tension est CB l'intensité est nulle et la tension aux bornes du condensateur est égale à la tension totale, de sorte que

le rapport $\frac{BB'}{CB}$ est égal à C_1 . En appelant C la capacité telle que je l'ai définie, on a donc $C_1 = \frac{C}{\cos \alpha}$.

On associe ensuite en dérivation un condensateur parfait C_2 et une résistance R_2 (fig. 17) de manière à obtenir le même cycle. On a $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_2 C_2 \omega}$ et la capacité C_2 est maintenant égale à $\frac{AA'}{CA}$, ce qui donne $C_2 = C \cos \alpha$.

Ainsi on obtient un même cycle avec deux capacités C_1 et C_2 bien différentes. Quand on opère sur un condensateur imparfait le tracé du cycle n'est donc pas suffisant pour déterminer sa capacité ; on doit faire des hypothèses sur la constitution de son diélectrique, l'assimiler par exemple à un ensemble de condensateurs et de résistances disposés un peu arbitrairement. L'expérience seule peut montrer si ces hypothèses sont légitimes.

Ce qui précède montre pourtant que si l'angle de pertes est très faible, les valeurs

$$C_1 = \frac{C}{\cos \alpha} \text{ et } C_2 = C \cos \alpha$$

sont peu différentes de la valeur C mesurée au balistique. On peut donc utiliser ces diverses méthodes, dans des conditions normales de fréquence et de température, mais il ne faut accepter qu'avec précaution les résultats qu'elles donnent à très basse fréquence ou à température un peu élevée.

CHAPITRE III

MESURE DIRECTE DE LA CAPACITE ET DES PERTES

Dans le chapitre précédent, j'ai indiqué comment on pouvait, une fois les cycles de viscosité obtenus, en déduire la capacité et les pertes. Je dois étudier maintenant d'autres méthodes qui permettent d'arriver au même résultat sans nécessiter le tracé du cycle.

I. MÉTHODE CALORIMÉTRIQUE. — A. *Historique*. — Les mesures calorimétriques furent les premières en date. Dès 1861, Siemens (*) constata l'échauffement des bouteilles de Leyde, mais les expériences systématiques ne commencèrent guère qu'une vingtaine

(*) SIEMENS. *Monatsbericht Berliner Akademie*, oct. 1861.

d'années plus tard avec Naccari et Bellati ⁽¹⁾. Leurs travaux furent repris par Kleiner ⁽²⁾ et surtout par un de ses élèves, Duggelin ⁽³⁾ qui étudia un grand nombre de substances.

Ces études, faites à une époque où les moyens d'investigation étaient médiocres, n'ont pu donner que des résultats qualitatifs ; il serait sans intérêt d'en faire ici une critique détaillée. Je me bornerai à donner le principe de la méthode de Duggelin pour montrer dans quelles conditions défectueuses se faisaient les expériences.

Le condensateur étudié est mis en série avec un autre beaucoup plus grand ; aux bornes de chacun d'eux, se trouve un éclateur muni d'un micromètre. On alimente le tout par une machine statique, en s'arrangeant pour que le nombre d'étincelles éclatant par seconde aux bornes du grand condensateur soit assez petit pour pouvoir être compté. Connaissant le rapport des deux capacités, on en déduit le nombre de charges et de décharges du condensateur étudié ; la tension est déduite de l'écartement des micromètres ; l'échauffement est mesuré avec une pince thermoélectrique.

Les critiques que l'on peut adresser à ce montage sont nombreuses. En premier lieu, le condensateur étudié est soumis à une série de charges et de décharges oscillantes et par suite à des oscillations de fréquence bien plus élevée que celle qu'on déduit du rapport des capacités et du nombre d'étincelles. En second lieu, ce rapport n'a pas de sens précis, puisqu'un condensateur imparfait n'a pas une capacité bien définie. Enfin, la mesure de la tension est grossière et les soudures thermoélectriques, mal protégées contre le refroidissement dans ces expériences, ne peuvent donner une valeur précise de l'échauffement. Aussi, les résultats obtenus semblent inexacts ; en particulier, ils indiquaient que les pertes sont simplement proportionnelles à la tension.

Peu à peu, les méthodes de mesure devinrent plus précises. Les principaux perfectionnements successifs furent les suivants :

Utilisation d'un calorimètre au lieu d'une pince thermoélectrique (Fritz) ⁽⁴⁾.

(1) NACCARI ET BELLATI. *Atti di Torino*, t. XVII, 1882.

(2) KLEINER. *Vierteljahrsschrift Zürich*, t. XXXVII, 1893.

(3) DUGGELIN. *Vierteljahrsschrift Zürich*, t. XXXIX, 1895.

(4) FRITZ. *Ueber Warmetonung bei electrischer Polarisation des Glases*. T 1893. Zurich, 1893.

Remplacement d'une machine statique par une bobine d'induction (Benischke, Houllévigüe) ⁽¹⁾.

Emploi de tensions sinusoïdales qui soumettent le condensateur à un régime plus régulier et sont mesurables avec plus de précision (Rosa et Schmidt) ⁽²⁾.

Enfin, tout récemment, M. Bouzon a réussi à obtenir un échauffement notable avec une quantité très restreinte de diélectrique en employant des ondes entretenues de fréquence très élevée émises par une lampe à 3 électrodes.

B. *Avantages.* — Les méthodes calorimétriques sont précieuses lorsqu'on doit comparer des mesures faites à des fréquences très différentes. Alors que dans la plupart des autres méthodes, on doit tenir compte avec plus ou moins d'exactitude de perturbations variables avec la fréquence (imperfections des condensateurs étalons, des résistances, capacités parasites, etc.), les erreurs systématiques que l'on pourrait commettre dans les mesures calorifiques ont été étudiées depuis longtemps ; si la sensibilité est limitée, on peut, par contre, être *absolument sûr* de l'approximation obtenue.

C. *Mesure de la quantité de chaleur.* — Les condensateurs employés dans mes essais à haute fréquence sont constitués de la manière suivante : un tube de laiton étamé est recouvert du diélectrique à étudier, puis de papier d'étain ; sur celui-ci est bobinée une couche de fil isolé d'une résistance de quelques ohms. Enfin, le tout est enveloppé dans une étoffe de soie bien sèche, placé dans un tube à double paroi, genre Dewar, qui s'oppose au refroidissement et mis à l'abri du rayonnement des lampes.

Le thermomètre, sensible au $\frac{1}{100^{\circ}}$ de degré, est placé à l'intérieur du tube ⁽³⁾ ; l'expérience montre qu'il est nécessaire de remplir celui-ci à moitié d'eau ou de pétrole pour régulariser la température et assurer le transport de la chaleur au thermomètre.

D. *Etalonnage.* — La puissance dégagée dans le condensateur

⁽¹⁾ BENISCHKE. *Elekt. Zeitschrift*, 1895.

HOULLEVIGÜE. *Journal de Physique théorique et appliquée*, 1897, 3^e Série, t. VIII, D. 113.

⁽²⁾ ROSA ET SCHMIDT. *Physical Review*, 1899, t. VIII, p. 1.

⁽³⁾ Dans cette position, le thermomètre est soustrait à l'action de tout champ électrique. Au cours d'essais effectués sur un condensateur plan, où le thermomètre était placé entre les lames, j'ai constaté des échauffements tout à fait anormaux ; dans ces conditions, à cause de la présence du mercure, le champ à l'intérieur du verre du thermomètre était extrêmement intense et, de ce fait, il s'y produisait des pertes notables.

est proportionnelle à l'échauffement par unité de temps. Il m'a paru illusoire de calculer le coefficient de proportionnalité au moyen des chaleurs spécifiques de chacun des constituants ; il aurait été plus précis de mesurer directement la chaleur spécifique moyenne de l'ensemble en ajoutant une certaine quantité d'eau chaude dans le tube.

Afin de me mettre complètement à l'abri des erreurs dues au rayonnement, j'ai préféré que, pour l'étalonnage et pour les essais en alternatif, le dégagement de chaleur ait lieu *au même endroit et pendant le même temps*.

Pour cela, je mettais l'enroulement auxiliaire en communication avec un accumulateur, par l'intermédiaire d'un rhéostat. Je lisais, à l'ampèremètre et au voltmètre, le courant i absorbé sous la tension u , puis, au bout de 5 minutes par exemple, je coupais le courant ; quelques secondes après, le thermomètre s'arrêtait, indiquant un échauffement δt . Si, pendant l'essai en alternatif, qui durait également 5 minutes, sous la tension efficace U et avec l'intensité I , j'obtenais un échauffement Δt peu différent de δt , je pouvais en déduire pour l'angle de perte :

$$\sin \alpha = \frac{u}{U} \times \frac{i}{I} \times \frac{\Delta t}{\delta t}.$$

E. *Appareils de mesures électriques.* — La méthode calorimétrique m'ayant servi pour étudier les pertes dans les diélectriques entre 1 000 et 300 000 p:s environ, j'ai dû mesurer des courants très différents.

Pour les intensités les plus faibles, j'utilisais un thermocouple fer-constantan, d'une résistance de 18 ohms, formé de deux fils fins croisés et placés dans le vide ; deux extrémités voisines étaient reliées au circuit oscillant, les deux autres à un galvanomètre sensible à courant continu.

Pour des intensités supérieures, je ne pouvais songer à shunter le thermocouple, car le facteur de réduction aurait été fonction de la fréquence ; je ne touchais donc rien *du côté alternatif*, mais je mettais *du côté continu* une résistance en série avec le galvanomètre, pour réduire sa déviation.

Au delà de 10 milliampères, de peur que la température de ce thermocouple ne devint excessive pour sa bonne conservation, je le remplaçais par un autre de 2 ohms. Enfin, à partir de 35 milliampères, j'employais un ampèremètre thermique sensible.

Je n'ai pu étalonner mes thermocouples sur du courant continu

qu'avec une approximation insuffisante. En courant alternatif, la déviation ne dépend que de l'effet Joule proportionnel au carré du courant ; en courant continu, il s'y superpose un effet Peltier réversible, simplement proportionnel au courant et changeant de sens avec lui. Théoriquement donc, au moyen de deux mesures faites en courant continu, j'aurais pu éliminer l'effet Peltier ; pratiquement, pour les faibles intensités que j'utilisais, il était nettement prépondérant et je n'obtenais par différence que des résultats un peu incertains.

J'ai donc effectué l'étalonnage en courant alternatif, à 900 p.s, par comparaison avec l'ampèremètre thermique préalablement étudié au potentiomètre. Le thermocouple était mis en série avec un condensateur de 0,01 μ F, le thermique avec un condensateur de 0,2 μ F, et l'ensemble était connecté à une bobine couplée par induction avec un circuit exciteur à 900 p.s. En faisant varier le couplage, j'obtenais différentes intensités au thermique ; je divisais par 20 pour avoir celles qui traversaient le thermocouple (la correction nécessitée par les résistances du thermocouple et du thermique est inférieure au millième). La courbe d'étalonnage obtenue était d'allure parabolique, les déviations étant sensiblement proportionnelles aux carrés des intensités alternatives.

La position relative de l'électromètre et de l'ampèremètre n'est pas indifférente. La capacité du premier, variable d'ailleurs avec la tension, n'est pas négligeable devant celle du condensateur ; pour le multicellulaire que j'utilisais le plus souvent, elle atteignait 0,05 m μ F sous la tension maximum. La résistance de l'ampèremètre est de 20 ohms environ, de sorte que la chute de tension pour 0,1 ampère est de 2 volts, mais sensiblement en quadrature avec la tension totale. C'est donc le montage indiqué sur la figure 2 qu'il convient d'adopter.

II. MÉTHODE WATTMÉTRIQUE. — La méthode du wattmètre a été utilisée la première fois par Steinmetz ⁽¹⁾ en 1892, pour des condensateurs au papier paraffiné de grande capacité. Elle a été étendue depuis à des capacités beaucoup plus faibles (Swingedauw, Rennesson, Frigon) ⁽²⁾.

⁽¹⁾ STEINMETZ. *Electrical Engineer*, 1892, p. 272.

⁽²⁾ SWINGEDAUW. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1919, t. CLXVIII, p. 231.

RENNESSON. *Revue générale de l'Electricité*, t. VII, p. 579. 1920.

FRIGON. *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4^e Série, tome II, août 1922.

A. Ce qui rend délicat la mise en œuvre de ces dernières mesures, c'est que l'on demande au wattmètre deux qualités difficilement compatibles : être d'une grande sensibilité et n'introduire aucun déphasage supplémentaire. Il faut, pour obtenir ce résultat dans les wattmètres électrodynamiques, donner au fil de suspension un couple de torsion extrêmement faible, ce qui permet de réduire également le couple électrodynamique en donnant aux bobines un nombre de spires relativement peu important ; on peut alors mettre en série avec le circuit à fil fin une très grande résistance et donner au circuit à gros fil une résistance et une inductance négligeables.

B. Il est commode pour les hautes tensions (Skinner) ⁽¹⁾ de remplacer le wattmètre électrodynamique par un wattmètre électrostatique. Le fonctionnement de cet appareil est simple, surtout si l'on opère sur un électromètre du type Blondot et Curie (fig. 18).

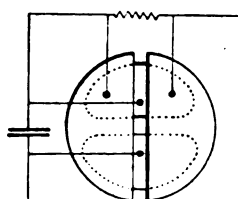


Fig. 18.

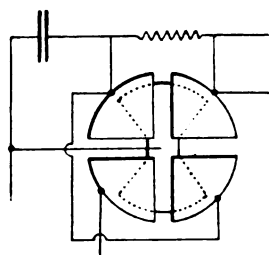


Fig. 19.

Le couple électrostatique instantané est proportionnel à la tension entre les secteurs mobiles et à la tension entre les quadrants fixes. Pour que la déviation moyenne soit proportionnelle à la puissance, il faut que l'une de ces tensions soit proportionnelle au courant, l'autre à la tension aux bornes de l'appareil d'utilisation. Il suffit pour cela de relier les secteurs mobiles aux bornes du condensateur et les quadrants fixes aux extrémités d'une résistance mise en série avec lui.

Si l'on emploie un électromètre ordinaire (fig. 19), il faut deux mesures pour connaître la puissance. La déviation de l'électromètre est maintenant proportionnelle à la tension entre les quadrants et à la tension entre l'aiguille et le milieu de la résistance. Il en résulte qu'on mesure, outre la perte dans le condensateur, l'effet Joule dans la moitié de la résistance ; pour éliminer cette der-

⁽¹⁾ SKINNER. *Journal of the Franklin Institute*, juin 1917, t. CLXXXIII, p. 667.

nière, on fait une deuxième lecture après avoir relié l'aiguille à l'un des quadrants et on fait la différence.

C. Les indications du wattmètre sont insuffisantes pour renseigner complètement sur le condensateur ; il faut connaître aussi la tension et l'intensité. On peut utiliser pour cela un voltmètre et un ampèremètre. J'ai préféré dans la plupart des essais opérer différemment et mesurer l'une après l'autre les puissances actives et réactives.

Pour cela, j'ai utilisé du courant diphasé. Le condensateur est toujours alimenté par la même phase ; le circuit à fil fin du wattmètre est, au contraire, branché tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre. La déviation est proportionnelle dans un cas à $U \sin \alpha$, dans

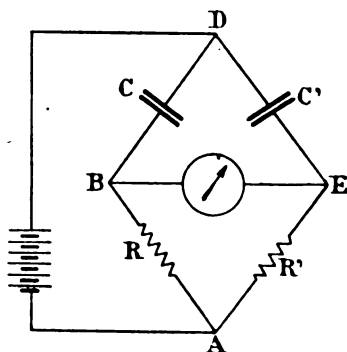


Fig. 20.

l'autre à $U \cos \alpha$. Le rapport entre ces deux quantités est égal à la tangente de l'angle de pertes totales. Quant à la capacité, on la déduit de la puissance réactive absorbée sous cette tension par un condensateur parfait étalon.

III. MÉTHODE DU PONT. THÉORIE. — La méthode du pont est une des plus intéressantes et j'y consacrerai deux paragraphes. Dans l'un, j'exposerai la théorie ; dans l'autre, j'indiquerai les difficultés que soulève sa réalisation pratique.

A. *Pont de Sauty*. — Considérons d'abord (fig. 20) un pont de Wheatstone A B D E formé de deux résistances, deux condensateurs *parfaits* et un téléphone ; alimentons-le par un courant quelconque, continu ou alternatif. Le téléphone restera muet si le courant s'établit suivant la même loi dans les circuits dérivés ABD et AED, ce qui exige que les constantes de temps CR et $C'R$ soient égales. C'est la méthode classique de Sauty.

B. Ponts de Wien et de Nernst. — Imaginons maintenant que l'un des condensateurs C soit imparfait; la différence de potentiel entre B et E ne pourra plus être annulée quelles que soient les valeurs de R et de R' et l'équilibre sera impossible dans le cas le plus général. Mais si on s'est placé dans le cas particulier d'une tension sinusoïdale, on pourra rétablir le silence au téléphone en plaçant en dérivation sur le condensateur parfait (fig. 21) ou en série avec lui (fig. 22), une résistance convenable; on a donc le choix entre deux montages, le premier employé par Nernst, le second par Wien.

Dans chacune de ces dispositions, on obtient, lorsque le télé-

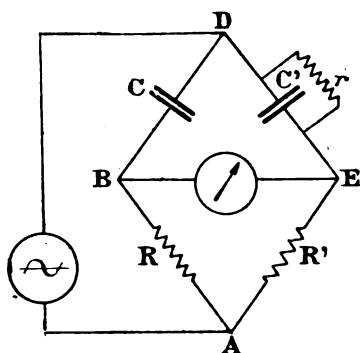


Fig. 21.

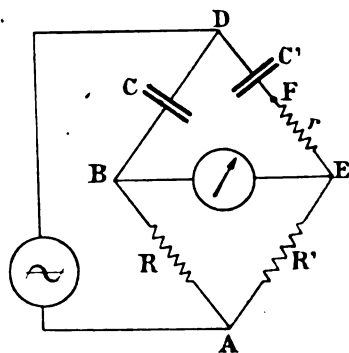


Fig. 22.

phone est muet, deux équations d'équilibre; la première est la relation $CR = C'r$ comme dans la méthode de Sauty. La seconde indique que l'angle de perte est le même dans les branches BD et ED ; en appelant r la résistance supplémentaire ajoutée au condensateur parfait C' l'angle de perte du condensateur imparfait est donné par la formule :

$$\operatorname{tg} \alpha = C'r \omega \text{ (méth. de Wien) ; } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{C'r \omega} \text{ (méth. de Nernst)}$$

C. Comparaison du pont de Wien et du pont de Nernst. — Il y a lieu de faire ici une remarque qui me paraît fondamentale : les résultats obtenus en déterminant la capacité d'un condensateur imparfait par ces deux méthodes ne peuvent pas, *théoriquement*, être identiques parce qu'ils ne correspondent pas à la même définition.

1° Il est évident, en premier lieu, que les méthodes du pont ne peuvent pas donner pour la capacité le même résultat. Ce

qu'elles fournissent, en effet, sans ambiguïté, ce sont les puissances active et réactive absorbées par le condensateur étudié ; mais lorsque de la valeur de cette dernière, on veut déduire la capacité par les formules indiquées plus haut, on suppose implicitement dans la méthode de Nernst qu'elle est absorbée sous la tension totale DE; dans la méthode de Wien, au contraire, on admet qu'elle est absorbée sous la tension DF qui existe aux bornes du condensateur parfait de comparaison, ce qui est bien différent.

2° Comparons maintenant les capacités obtenues au pont à celle que donne le balistique ; pour simplifier, supposons égaux les bras R et R' du pont.

Considérons d'abord un condensateur C présentant de la *viscosité mais sans fuites*. Dans la méthode de Wien, le condensateur C et le condensateur C' de comparaison emmagasinent la même quantité d'électricité maximum ; mais les tensions maximum auxquelles ils sont soumis ne sont pas égales et leur rapport est $\cos \alpha$. Le rapport entre la capacité définie au balistique et la capacité mesurée au pont est donc $\cos \alpha$.

Dans la méthode de Nernst, le rapport entre les quantités maximum d'électricité qui traversent C et C' est $\frac{1}{\cos \alpha}$, les tensions maxima sont les mêmes pour C et C'; le rapport entre la capacité définie au balistique et la capacité mesurée au pont est donc $\frac{1}{\cos \alpha}$.

Examinons maintenant le cas d'un condensateur *sans viscosité mais avec fuites*.

Dans la méthode de Wien, le rapport entre les quantités d'électricité maximum emmagasinées par C et C' est $\cos \alpha$; le rapport entre les tensions maximum supportées est $\frac{1}{\cos \alpha}$; le rapport des capacités obtenues au balistique et au pont est donc $\cos^2 \alpha$. La méthode de Nernst donnera, par contre, pour la capacité, la même valeur que celle du balistique ; ce dernier appareil n'est pas, en effet, influencé par les fuites.

3° Ainsi, pour des condensateurs *présentant de la viscosité sans fuites ou des fuites sans viscosité*, la capacité obtenue au pont de Wien est toujours $\frac{1}{\cos^2 \alpha}$ fois plus grande qu'au pont de Nernst. Rien n'empêcherait évidemment de compliquer légèrement les

formules adoptées de manière à obtenir au pont, pour de tels condensateurs, des résultats identiques à ceux que donne le balistique. Mais il faut bien remarquer que ces formules ne seraient pas valables pour les condensateurs ordinaires qui possèdent *à la fois de la viscosité et des fuites* ; le pont à courant alternatif est en effet insuffisant pour indiquer dans quelle proportion les pertes sont dues à la viscosité ou aux fuites. L'emploi du courant continu ne peut donner qu'une approximation très grossière dans la mesure des fuites, et c'est pour cela que j'ai adopté précédemment la méthode du balistique pour définir dans le cas le plus général la capacité d'un condensateur.

Dans les conditions ordinaires, $\cos \alpha$ est très voisin de 1, de sorte qu'il n'y a pas grand écart entre les valeurs de la capacité obtenue par les différentes méthodes. Il en serait tout autrement si, dans les conditions de la mesure, les pertes étaient importantes ; on en trouvera plus loin un exemple, en étudiant l'influence de la température.

D. *Influence des harmoniques.* — C'est dans le cas particulier d'une tension sinusoïdale qu'ont été établies les formules :

$$\operatorname{tg} \alpha = C' r \omega \text{ (Wien)} \qquad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{C' r \omega} \text{ (Nernst)}.$$

Dans le cas d'une tension quelconque, il est impossible d'obtenir le silence au téléphone. Il faudrait, en effet, pour cela que la résistance r fût la même pour tous les harmoniques, ou ce qui revient au même, que $\operatorname{tg} \alpha$ fût proportionnel à la fréquence (Wien) ou variât en raison inverse (Nernst). Or, en première approximation, l'angle de perte est indépendant de la fréquence. Par suite, lorsqu'en procédant à la mesure, on s'approche suffisamment de l'équilibre relatif à la fréquence fondamentale, les harmoniques supérieurs apparaissent brusquement dans le téléphone ; s'ils sont suffisamment intenses, ils enlèvent toute précision au résultat.

On peut remédier en partie à cet inconvénient en employant des appareils de zéro susceptibles d'entrer en résonance *mécanique* (monotéléphones, galvanomètres de résonance), mais la solution réellement efficace consiste à épurer la tension d'alimentation par un nombre suffisant de résonances *électriques*.

E. *Conditions de sensibilité.* --- Lorsque l'on se contente de mesurer au pont la capacité de bons condensateurs, pour des fréquences normales, l'approximation obtenue est supérieure au

millième, quelles que soient R et R' . Il n'en est pas de même quand on doit déterminer les pertes, car il s'agit alors d'annuler le minimum précédemment obtenu ; si R et R' ne sont pas convenablement choisies, la sensibilité est souvent insuffisante. Essayons de déterminer approximativement dans quelles conditions il faut se placer pour obtenir dans la méthode de Wien l'angle de perte avec le plus de précision.

Prenons comme origine des phases celle de la tension d'alimentation, supposons que l'impédance de l'appareil de zéro est infinie et appelons I et I' les courants dans les deux branches du pont.

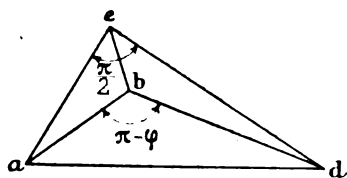


Fig. 23.

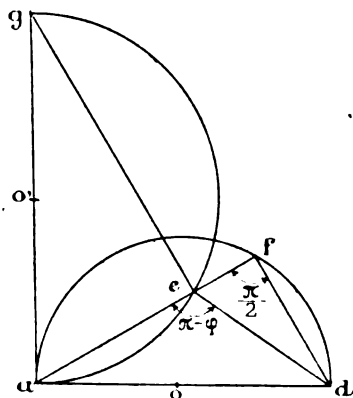


Fig. 24.

La tension aux bornes du condensateur imparfait C est déphasée d'un angle φ sur le courant qui le traverse, tandis que la tension aux bornes de R est en phase avec lui ; si nous représentons (fig. 23) ces quantités par bd et ab , l'angle abd sera égal à $\pi - \varphi$. D'un autre côté, si nous supposons momentanément $r = 0$, nous pouvons représenter les tensions aux bornes de C et de R par ed et ae , l'angle aed étant droit. La tension aux bornes de l'appareil de zéro sera représentée en grandeur et en phase par be et l'on voit qu'il est impossible de l'annuler tant que r est nul. Si au contraire r est différent de zéro, on pourra amener e à coïncider avec b par un réglage convenable de r et de $\frac{R}{R'}$.

Voyons comment varie la tension be quand, R étant donné (fig. 21), on fait varier indépendamment R' et r .

1° r étant supposé constant, le déphasage φ dans le circuit AED

est constant puisque sa tangente est égale à $\frac{1}{C' r \omega}$; l'angle $aed = \pi - \psi$ est constant. Si nous faisons croître R' , l'intensité I' et par suite le vecteur ae diminueront; le point e se rapprochera de a en décrivant le segment capable de l'angle $\pi - \psi$.

2° Donnons maintenant à R' une valeur constante et faisons augmenter r . L'angle $\pi - \psi$ grandira et le point e se déplacera vers des segments capables d'angles plus obtus.

Menons par e la normale eg à ae ; les angles fde et aeg sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires, de sorte que les triangles fde et eag sont semblables. Nous avons donc :

$$\frac{ag}{ad} = \frac{ae}{fd}.$$

Ce dernier rapport peut s'évaluer facilement ; en effet :

$$ae = R' I' \quad fd = \frac{I'}{C' \omega}, \quad \text{donc} \quad ag = ad \times R' C' \omega = C'^2.$$

Le point e se déplacera donc sur un cercle O' de diamètre ag orthogonal au cercle O .

Le réglage de r sera obtenu avec d'autant plus de précision que la tension be sera plus grande pour un déphasage donné ; il est facile de voir que pour des déphasages pas trop considérables, be sera voisin du maximum quand les cercles O et O' seront égaux, c'est-à-dire pour $R' C' \omega = 1$.

Ceci montre qu'il faut constituer les bras du pont avec des résistances d'autant plus élevées que la fréquence est plus faible. Pour fixer les idées, avec des condensateurs de l'ordre de $1 \mu F$, R et R' doivent être environ de :

100 000 pour les très basses fréquences ($f = 1$ ou 2 p.s);

5 000 pour les fréquences industrielles ($f = 25$ ou 50 p.s);

500 pour les fréquences téléphoniques ($f = 500$ ou $1\,000$ p.s).

Si, par exemple, on n'employait qu'une résistance de 100 ohms pour une fréquence de 20 p.s, le diamètre du cercle O' ne serait que le centième de celui de O , et l'on n'aurait aucune précision.

F. *Appareils de zéro.* — En principe, n'importe quel appareil à courant alternatif peut servir d'appareil de zéro ; on emploie couramment les suivants :

Galvanomètre de résonance. C'est le plus sensible et le plus commode à basse fréquence;

Electrodynamomètre, les deux enroulements étant connectés en série ;

Galvanomètre à courant continu monté en série avec une galène qui détecte le courant alternatif;

Téléphone ordinaire ou monotéléphone.

Le galvanomètre de résonance et le téléphone sont les plus sensibles ; ils ont, en effet, l'avantage de posséder un aimant permanent, de sorte que le couple électromagnétique y est proportionnel à l'intensité ; au contraire, dans l'électrodynamomètre, le couple est proportionnel au carré de l'intensité ; il en est de même dans le galvanomètre ordinaire équipé avec une galène, celle-ci ne détectant que partiellement les courants très faibles. Enfin, l'usage de ces deux derniers appareils ne permet pas d'éliminer les harmoniques.

J'ai utilisé comme galvanomètre de résonance un galvanomètre ordinaire transformé ; comme son réglage était très limité, je ne pouvais m'en servir qu'entre 40 et 60 p.s. Pour les autres fréquences inférieures à 400 p.s, j'ai employé un galvanomètre sensible à cadre mobile, muni d'une galène ; au-dessus de 400 p.s, je me suis servi d'un casque téléphonique de $2 \times 4\,000$ ohms.

Remarque. — Dans le réglage du pont, il est nécessaire d'ajuster *simultanément* deux résistances, ce qui conduit à de nombreux tâtonnements. On peut les réduire dans une certaine mesure, en choisissant comme appareil de zéro un instrument sensible non seulement à la grandeur, mais encore à la phase de la tension. J'y suis parvenu aux basses fréquences, en utilisant du courant diphasé. L'appareil de zéro était un électrodynamomètre ; un de ses enroulements était connecté au pont ; l'autre était alimenté à travers une inductance et une résistance réglables, par l'une quelconque des phases, à volonté. Ce montage permettait de savoir sur quelle résistance R' ou r il fallait agir.

IV. MÉTHODE DU PONT. RÉALISATION PRATIQUE. — Le montage d'un pont présente un certain nombre de difficultés ; j'examinerai successivement celles que l'on rencontre dans le cas de capacités très grandes ($1\ \mu\text{F}$) et très petites ($1\ \text{m}\ \mu\text{F}$).

A. *Condensateurs de grande capacité* ($1\ \mu\text{F}$). — La construction de résistances ne présente dans ce cas aucune difficulté. Pour la sensibilité maximum, les bras du pont doivent avoir une résistance de l'ordre de $\frac{1}{C\omega}$, c'est-à-dire :

3 200 ohms à la fréquence 50 p.s et 180 à la fréquence 900 p.s.

Si la valeur de $\operatorname{tg} \alpha$ est 0,05, il faut une résistance série égale à $r = \frac{0,05}{C \omega}$, c'est-à-dire :

160 ohms à la fréquence 50 p.s et 9 ohms à la fréquence 900 p.s.

Pour de telles capacités, la sensibilité est grande, car le courant qui traverse les condensateurs est suffisamment intense ; l'impédance des bras du pont étant bien plus faible que celle de l'appareil de zéro, le léger courant qui traverse ce dernier lorsque l'équilibre n'est pas atteint ne trouble pas sensiblement la répartition des tensions.

Mais l'emploi de capacités considérables présente deux inconvénients qui, la plupart du temps, sont prohibitifs :

1° Il n'existe pas de condensateur étalon de 1 μ F rigoureusement exempt de pertes ; on peut bien employer le mica, mais son emploi n'est légitime que si les condensateurs étudiés sont relativement mauvais et si, par suite, on ne veut calculer les pertes qu'avec une faible approximation absolue. (1)

2° La fabrication des condensateurs à étudier est longue et ne peut être pratiquement réalisée que dans des cas particuliers (par exemple : papier paraffiné, mica, caoutchouc très mince) ; en tous cas, leur montage et leur démontage rapides sont impossibles, de sorte qu'on ne peut avec eux étudier facilement l'influence de l'épaisseur, de l'humidité, du contact avec les armatures, etc.

B. Condensateurs de faible capacité (1 m μ F). — Dans ce cas, et lorsqu'on opère à une tension assez basse pour qu'il n'y ait pas d'effluves, l'étalon de capacité peut être facilement réalisé avec un condensateur à air ; mais il ne faudrait pas croire que tous les condensateurs à air soient absolument parfaits. Ils contiennent, en effet, une plus ou moins grande quantité d'isolants solides, et, si ceux-ci ne sont pas judicieusement placés, ils peuvent être le siège de pertes notables.

(1) Pour éviter l'emploi d'un condensateur à mica, on peut utiliser n'importe quel procédé permettant d'obtenir un déphasage variable et calculable.

Par exemple, si l'on possède deux alternateurs identiques dont les rotors sont accouplés rigidement et dont les stators peuvent prendre l'un par rapport à l'autre un déplacement angulaire quelconque, le problème est facilement résolu.

On peut aussi connecter une résistance entre deux bornes consécutives d'un alternateur diphasé ; entre un point quelconque de cette résistance et le point neutre, existe une tension dont on peut faire à volonté varier la phase.

Ce dernier dispositif ne m'a pas donné beaucoup plus de précision que le condensateur à mica, je n'insiste pas sur sa réalisation.

En particulier, il faut rejeter absolument la construction la plus simple (fig. 25) qui consiste à intercaler des cales isolantes entre des plaques métalliques et à joindre celles-ci alternativement à deux bornes ; ces cales, en effet, sont nombreuses et soumises à un champ intense, de sorte que les pertes y sont appréciables.

Le montage employé doit s'inspirer de celui de la figure 26, où les plaques d'une même polarité sont soudées entre elles et où chacune des armatures est supportée par des colonnettes reposant sur de la paraffine. Dans ces conditions le champ dans l'isolant est aussi réduit que l'on veut, de sorte que le condensateur peut être considéré comme parfait.

Il faut remarquer ici que la mesure des pertes de tels condensateurs à air est à peu près impossible ; elles sont beaucoup trop petites pour être décelées par la méthode calorimétrique ; elles

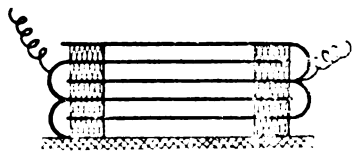


Fig. 25.

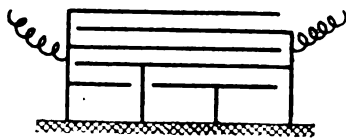


Fig. 26.

ne peuvent non plus être mesurées en courant continu ; on doit se borner à construire plusieurs étalons, à les comparer et à n'utiliser que le meilleur.

Un des avantages des étalons de capacité de l'ordre de quelques μF , c'est que l'on peut rendre aisément leur capacité variable ; il suffit pour cela d'en modifier légèrement la construction pour permettre à l'une des armatures d'entrer plus ou moins profondément dans l'autre. Il est facile ensuite de construire leur courbe d'étalonnage ; mais il est nécessaire de vérifier que, dans la position la plus défectueuse, c'est-à-dire au zéro de la graduation, l'angle de perte est encore négligeable : on les compare pour cela avec un condensateur non variable comme ceux que j'ai décrits précédemment.

Par contre, si les capacités étudiées sont faibles, certaines capacités parasites pourront prendre une importance appréciable ; il en est ainsi par exemple de la capacité des fils de connexion par rapport au sol si ceux-ci ne sont pas à une distance suffisante de la table d'expériences. Mais c'est surtout la capacité réciproque des deux condensateurs utilisés qu'il faut réduire ; il faut obliger

pour cela les lignes de force électrique qui émanent d'une armature à aboutir à l'armature opposée, et le meilleur moyen consiste à entourer complètement la première par la deuxième ; on y arrive aisément dans les condensateurs fixes en les constituant par un nombre impair de lames, dans les condensateurs variables en les enveloppant d'un cylindre métallique en communication avec l'armature fixe. (1)

Résistances. — Lorsqu'on emploie d'aussi petites capacités (de 1 m μ F), il faut employer des résistances très élevées, mille fois plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs, que lorsqu'on emploie des capacités de l'ordre de 1 μ F. On est donc conduit à utiliser pour les bras du pont des résistances variables de l'ordre de quelques mégohms à 50 p:s et de quelques centaines de mille ohms à 900 p:s ; or, des résistances aussi importantes ne peuvent être complètement dénuées d'inductance ni de capacité.

Il est intéressant de remarquer que, dans tous les cas, la résistance à mettre en série avec le condensateur parfait pour obtenir l'équilibre est $\frac{1}{1\mu^2 \alpha}$ fois plus petite que celle qu'il faudrait mettre en dérivation pour obtenir le même résultat ; il convient donc d'utiliser exclusivement la méthode de Wien qui permet d'employer des résistances environ mille fois plus faibles que celle de Nernst.

C. Modifications apportées au pont de Wien. — Les différents perfectionnements apportés à la constitution du pont sont les suivants :

1° Tout d'abord, on a utilisé pour les bras du pont des résistances en graphite, ce qui leur supprime toute inductance ou capacité, mais ne permet pas de les rendre variables d'une manière continue ; la résistance et la capacité de comparaison étaient toutes deux variables, ce qui permettait le réglage du pont.

2° Grover (2) a remplacé les résistances des bras du pont par deux condensateurs variables à air. Le condensateur étalon était fixe et la résistance en série variable. Ce montage et le suivant donnent aux capacités réciproques entre condensateurs une importance exceptionnelle.

3° Fleming et Dyke (3) ont utilisé trois condensateurs à air va-

(1) Je reviendrai sur cette question à propos de la méthode de résonance.

(2) GROVER. *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. 3, p. 371, 1907.

(3) FLEMING ET DYKE. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 49, p. 323, 1912.

riables et une résistance de comparaison fixe. Le matériel employé dans cette méthode est facile à se procurer, mais le réglage du pont est très délicat ; tout changement dans la capacité de l'un des condensateurs entraîne, en effet, un changement considérable dans celle de chacun des deux autres ; il faut tâtonner au hasard pendant assez longtemps, ce qui est un inconvénient grave dans beaucoup de cas. Enfin, on peut reprocher à ce montage de ne permettre d'étudier que des condensateurs dont la capacité ou les pertes varient seulement dans des limites assez restreintes : le matériel utilisé pour un condensateur donné ne peut servir à étudier un condensateur de capacité dix fois supérieure.

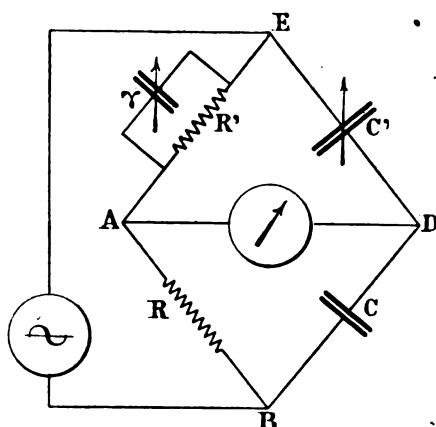


Fig. 27.

D. Montage utilisé. — Je me suis proposé de réaliser un dispositif permettant :

D'employer pour les bras du pont des résistances quelconques ;

D'étudier des condensateurs de capacité quelconque, tout en gardant la sensibilité maximum, en changeant seulement le condensateur étalon ;

De supprimer la grande résistance en série avec l'étalon.

1° J'ai obtenu les premiers résultats en permutant les diagonales du pont (fig. 27). Les résistances dont je me suis servi étaient en général égales et leurs valeurs étaient, suivant les cas, 500, 2 000 ou 10 000 ohms ; elles étaient constituées par du fil de maillechort d'une résistance de 400 ohms par mètre enroulé sur du mica et immergé dans du pétrole. J'obtenais ainsi des résistances pratiquement sans self-induction ni capacité et qui pouvaient sup-

porter sans chauffer des tensions atteignant une centaine de volts. (1)

Considérons maintenant le pont ainsi obtenu dans le cas où, pour simplifier, les résistances R et R' ainsi que les capacités C et C' sont égales.

Le courant dans les résistances est en phase avec la tension d'alimentation. Si la capacité étudiée est parfaite, le courant dans les condensateurs est en quadrature avant avec cette même tension ; les tensions en A et D sont égales et le pont est en équilibre.

Si le condensateur étudié est imparfait, le courant qui traverse DB est, par cela même, légèrement retardé ; on rétablira l'équilibre si, comme dans la méthode de Wien, on retarde de la même quantité le courant dans ED au moyen d'une résistance.

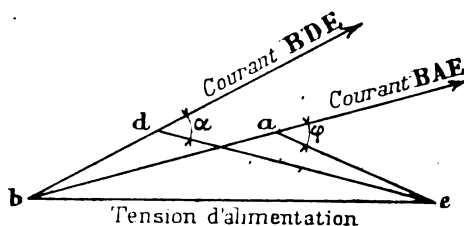


Fig 28.

Mais, et c'est là le point intéressant, on peut obtenir le même résultat en retardant le courant dans AB à l'aide d'une self-inductance ou en l'avancant dans EA au moyen d'une capacité (figure 28).

2° J'ai donc utilisé le dispositif suivant :

Un condensateur variable est placé en dérivation sur la résistance R' . Si γ est sa capacité actuelle, le déphasage φ du courant total sur la tension dans la branche EA est donné par :

$$\operatorname{tg} \varphi = \gamma R' \omega.$$

Lorsque le pont est en équilibre, ce déphasage φ du courant sur la tension dans la branche EA est égal en valeur absolue au déphasage α de la quantité d'électricité sur la tension dans la branche DB. L'angle de perte α du condensateur étudié est donc donné par $\operatorname{tg} \alpha = \gamma R' \omega$.

La capacité déduite de la formule $C = C'$ est non pas celle que

(1) Ces résistances de comparaison n'ont pas besoin d'être rigoureusement parfaites ; l'essentiel, c'est qu'elles soient affectées de la même manière par l'inductance et la capacité, ce qui est réalisé lorsqu'elles sont égales et bobinées de la même façon.

nous avons définie au balistique, mais celle que nous aurions obtenue par la méthode de Nernst.

La formule précédente montre que la capacité γ nécessaire pour obtenir l'équilibre ne dépend pas de la capacité du condensateur étudié mais dépend seulement des résistances du pont et de l'angle de perte. Avec un condensateur dont la capacité peut varier de 0,05 à 1 m μ F, et avec les valeurs 500, 2 000 et 10 000 ohms choisies pour les résistances, je puis mesurer à la fréquence 900 des angles de perte dont les tangentes sont comprises entre

$$10^{-9} \cdot 10^4 \cdot 2 \pi \cdot 900 = 0.06 \quad \text{et} \quad 0.05 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 2 \pi \cdot 900 = 0.00015.$$

A la fréquence de 50 p/s la valeur de 1 m μ F est insuffisante pour γ ; n'ayant pas à ma disposition de capacité variable beau-

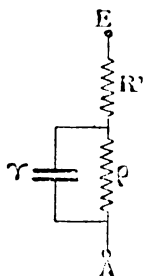


Fig. 29.

coup plus importante, je l'ai remplacée par un condensateur de 1 μ F shunté par une résistance z selon le schéma de la figure 29 ; dans ces conditions $\tan \alpha$ est donné par la formule :

$$\tan \alpha = \frac{z^2 \gamma \omega}{R (1 + z^2 \gamma^2 \omega^2) + z}.$$

Les pertes dans γ et la capacité de z n'ayant sur le résultat qu'une influence négligeable, j'ai pris pour γ un condensateur à mica et pour z une boîte de résistances ordinaire.

E. *Précautions indispensables.* — Pour la réalisation pratique du pont, j'ai pris enfin un certain nombre de précautions, afin d'éviter toute capacité parasite.

En premier lieu, tous les appareils étaient maintenus à une vingtaine de centimètres au-dessus de la table par des tubes de verre verticaux, les condensateurs variables étaient manœuvrés à distance au moyen de longs manches d'ébonite. Enfin deux condensateurs de 1 μ F étaient montés en série sur la tension d'alimentation et leur borne commune était à la terre.

Pour augmenter la sensibilité ⁽¹⁾ et rendre plus négligeable encore l'action des capacités parasites, je donnais autant que possible à mes condensateurs des capacités supérieures à 1 m μ F.

A la fréquence 900 p/s avec des résistances $R = R' = 2\,000$ ohms, une tension d'alimentation de 50 volts, des condensateurs de 3 m μ F, protégés contre toute capacité parasite et des écouteurs de 4 000 ohms, j'obtenais une approximation supérieure au millièrne pour la capacité et de l'ordre du centième pour les pertes. Le réglage des condensateurs C' et γ durait une quinzaine de secondes.

V. MÉTHODE DE RÉSONANCE. — A. *Principe*. — Un condensateur avec pertes est, à fréquence constante, assimilable à l'ensemble d'un condensateur parfait et d'une résistance. Pour mesurer cette

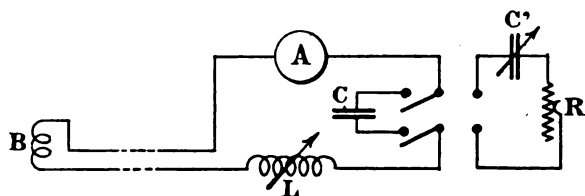


Fig. 30.

dernière, il suffit donc de compenser la capacité par une self-inductance satisfaisant à l'équation $CL\omega^2 = 1$.

La résistance R équivalente aux pertes se déduit alors de la loi d'Ohm : $I = \frac{E}{R}$.

Malheureusement, il n'existe pas de self-inductance parfaite et des pertes ainsi obtenues, il faut soustraire les pertes dans la bobine.

Celles-ci dépendent d'un grand nombre de facteurs (effet de peau, effet de bobinage, etc.), très difficile à évaluer. Aussi est-on conduit à opérer par substitution.

On forme donc un circuit oscillant (fig. 30), avec le condensateur étudié C , une inductance variable L , un ampèremètre et une bobine qui permet un couplage lâche avec un générateur d'ondes entretenues. On agit sur la bobine L jusqu'à ce que l'on obtienne à l'ampèremètre la déviation maximum.

⁽¹⁾ Lorsque la sensibilité est nettement insuffisante, on peut utiliser un amplificateur à lampes.

On remplace alors le condensateur étudié par un condensateur de capacité variable C' à air ⁽¹⁾ en série avec une résistance variable R ; sans toucher à L on fait varier C' et R jusqu'à ce que, à la résonance, l'intensité soit la même que dans le premier cas. La capacité du condensateur étudié est alors $C = C'$ et son angle de perte est déterminé par : $\operatorname{tg} \alpha = C'R \omega$.

B. Indicateur de résonance. — Le couplage devant être assez lâche pour que la résonance soit nette, l'intensité dans le circuit oscillant est relativement faible. Les ampèremètres thermiques ordinaires ne sont sensibles que pour des courants supérieurs au centième d'ampère et encore ont-ils pour cette sensibilité une forte résistance, une vingtaine d'ohms généralement ; pour des fréquences élevées, leur emploi est à peu près impossible parce que c'est en eux que se trouve la principale cause d'amortissement du circuit oscillant.

L'emploi de couples thermoélectriques est, au contraire, tout indiqué. Celui dont je me servais avait une résistance de 2 ohms environ ; comme il jouait simplement le rôle d'indicateur de résonance, je ne l'avais pas étalonné.

Je ne désirais pas une précision excessive dans mes mesures, mais plutôt un montage simple, autant que possible à l'abri d'erreurs systématiques. Aussi n'ai-je pas utilisé une intéressante méthode de zéro due à Bairsto ⁽²⁾ et dont il convient de rappeler le principe :

On oppose la f.e.m. thermoélectrique à une tension variable prise sur un potentiomètre ; on règle celui-ci pour que, à la résonance, un galvanomètre intercalé dans le circuit reste au zéro. On obtient ainsi une grande sensibilité.

Bairsto utilisait d'ailleurs un commutateur tournant qui permutait rapidement le condensateur étudié et l'étalon ; en série avec chacun d'eux se trouvait un thermocouple et c'est la différence de leurs échauffements qu'il mesurait. Cette dernière disposition, nécessaire lorsque les ondes sont produites par un générateur à arc forcément instable, est tout à fait inutile quand on emploie un générateur aussi régulier que des tubes électroniques et ne peut alors être qu'une source de complications et d'erreurs.

⁽¹⁾ Si l'on craint que le condensateur à air ne soit pas parfait, comme ses pertes sont indépendantes de sa capacité actuelle, on peut le laisser connecté en permanence, mais en le laissant au zéro.

⁽²⁾ BAIRSTO. *Proceedings of the Royal Society*, 1920, vol. XCVI, p. 363.

C. *Résistances*. — La résistance qu'il faut mettre en série (1) avec le condensateur à air pour obtenir le même amortissement qu'avec le condensateur étudié est relativement faible. Pour une capacité de 1 m μ F et une longueur d'onde de 1 000 mètres, sa valeur est :

5 ohms, pour $\text{tg } \alpha = 0,01$ et 0,5 ohms, pour $\text{tg } \alpha = 0,001$

La construction de telles résistances est aisée et l'on n'a pas, en général, à craindre l'influence du « skin effect ». En effet, le rapport entre la résistance R_1 en alternatif et la résistance R en continu ne dépend, à fréquence constante, que de la résistance linéaire et est égal, pour des matériaux non magnétiques à :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 l^2}{12 R^2} \text{ en unités C. G. S.}$$

En unités pratiques, en faisant apparaître le diamètre d du fil et sa résistivité ρ il vient :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 d^4}{19,5 \cdot 10^{10} \rho^2}$$

Pour que l'influence du « skin effect » soit inférieure à 1 pour 100 à la fréquence 300 000 p/s il faut que

$$\frac{4 \pi^2 \cdot 9 \cdot 10^{10} \cdot d^4}{19,5 \cdot 10^{10} \cdot \rho^2} < 10^{-2} \text{ ou } d < 15 \sqrt{\rho}$$

ce qui donne comme diamètre maximum :

0,2 mm pour le cuivre ;

0,45 mm pour le platine ;

1,5 mm pour le mercure ;

1 mm pour le constantan supposé non magnétique.

La longueur correspondante, indépendante de la nature du métal est environ 2 mètres pour 1 ohm.

Il convient de se tenir bien au-dessous des valeurs précédentes, mais on ne doit pas adopter le fil le plus fin que l'on ait à sa disposition, parce qu'il conduirait à des longueurs beaucoup trop petites, difficiles à mesurer et à fractionner. Avec du fil de 500 ohms par mètre, par exemple, il suffirait, pour une résistance de 1 ohm, de 2 mm de long ; même si l'on se contentait d'une approximation de 5 pour 100, il faudrait pouvoir faire varier la longueur de ce fil par fractions d'un dixième de millimètre, ce qui est extrêmement délicat. Au contraire, avec du fil de 50 ohms

(1) Bairsto mettait en dérivation sur le condensateur à air une résistance variable à eau.

au mètre, il suffit de faire varier la longueur millimètre par millimètre ⁽¹⁾.

D. *Couplage par capacité parasite.* — Une erreur systématique importante peut provenir de la capacité de fuite des condensateurs étudiés. Le condensateur du circuit en résonance produit des lignes de force ; toutes celles qui émanent d'une armature ne vont pas forcément tomber directement sur l'autre ; les unes vont aboutir aux murs de la salle ou à la table d'expériences, les autres au condensateur du circuit générateur d'ondes. Il s'ensuit qu'au couplage magnétique entre les deux circuits se superpose un couplage électrostatique ⁽²⁾. Si par exemple la capacité de fuite du condensateur étudié est plus grande que celle de l'étalon et si, d'autre part, le couplage électrostatique tend à renforcer le couplage électromagnétique, on devra, pour obtenir la même intensité à la résonance, augmenter la résistance de comparaison et, par suite, l'angle de perte observé sera supérieur à l'angle de perte réel.

De plus, les lignes de force qui aboutissent aux murs et à la table se ferment à travers de très mauvais diélectriques et introduisent un amortissement supplémentaire dans le circuit de résonance ().

Pour ces deux raisons, les mesures ne peuvent être correctes que si le condensateur étudié et le condensateur étalon ont des capacités de fuite identiques ; le procédé le plus efficace pour obtenir ce résultat consiste à enfermer les condensateurs dans des boîtes métalliques identiques et disposées de la même façon.

Comme dans la méthode du pont, j'ai dû éloigner tous les appareils utilisés à une vingtaine de centimètres de la table et les commander par de longs manches en ébonite. La zone de résonance étant fort étroite et les mesures n'étant légitimes qu'à la résonance exacte, j'ai dû employer un variomètre et un condensateur à air d'une extrême sensibilité. Le circuit de résonance était convenablement éloigné du circuit exciteur.

(1) On y arrive aisément en constituant à l'avance des cavaliers interchangeables, formés de fils de constantan soudés à deux gros fils de cuivre et en les plongeant dans deux godets remplis de mercure. On peut, d'ailleurs, obtenir une approximation supérieure en procédant par interpolation.

(2) Pour voir si ce couplage existe, il suffit d'inverser les pôles du condensateur en résonance ; le couplage par capacité change alors de signe.

(3) La masse du galvanomètre restant à un potentiel sensiblement constant, il peut se produire également des pertes (MESSEY, *Onde électrique*, mai 1922) dans l'isolant du fil, mais elles n'ont ici aucune importance, puisqu'elles subsistent pour les deux condensateurs.

en série et d'un shunt. Pour repérer la phase, on dispose sur l'axe de l'appareil une came qui fait fonctionner un timbre chaque fois qu'elle repasse par la même position.

Au début, on remplace momentanément le condensateur par une résistance, puis on fait tourner lentement la cuve à eau acidulée jusqu'à ce que le timbre se fasse entendre quand le spot est au zéro. Le réglage étant ainsi effectué, on remet le condensateur en place et l'on note la déviation β_0 quand le timbre se fait entendre et la déviation maximum β . Si l'étalonnage a donné une déviation θ pour le courant qui traverse 1 mégohm alimenté sous le $\frac{1}{n^e}$ de la tension normale, on en déduit immédiatement :

$$\text{L'impédance } s = \frac{n \theta}{\beta} \text{ mégohms ;}$$

L'angle des pertes totales $\cos \alpha' = \frac{\beta_0}{\beta}$ (si n est le même dans les deux cas) ;

$$\text{La capacité réactive } C_r = \frac{\beta_0}{\omega n \theta} \text{ microfarads.}$$

Les essais ont porté sur des condensateurs à papier paraffiné ; comme ces fréquences sont relativement peu intéressantes, je donne seulement les résultats relatifs à deux condensateurs ; les pulsations ω sont exprimées en radians par seconde, les capacités en microfarads :

CONDENSATEUR N° 2							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	53,5	25	3,08	0,47	2,08
0,0087	6,2	183	186	64	6,1	0,345	6,50
0,0018	6,2	183	130	27	8,7	0,208	13,2
CONDENSATEUR N° 3							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	129	23,7	1,28	0,184	1,94
0,0087	1	165	86		1,92		
0,0087	6,2	183		57		0,097	5,80
0,0018	1	165	77		2,14		
0,0018	6,2	183		27,5		0,052	13,5

J'ai déjà indiqué que l'essai à l'oscillographe devait être complété par une mesure de résistance en courant continu. Mais, dès à présent, il est possible de tirer des résultats précédents une conclusion intéressante : *la capacité réactive augmente énormément quand la fréquence diminue.*

Pour déterminer la capacité totale C telle que je l'ai définie au

balistique et l'angle de pertes par viscosité pure α , j'ai effectué un essai en courant continu. La résistance d'isolement obtenue a été :

$R = 12,5$ mégohms pour le condensateur n° 2.

$R = 2,65$ mégohms pour le condensateur n° 3.

En utilisant les relations géométriques simples données par la figure 32, j'ai alors calculé les nombres suivants :

CONDENSATEUR N° 2			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{S \omega}$	4,4	18,9	64
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin \alpha}{S \omega}$	3,90	17,8	63
$\frac{I}{R \omega}$	1,08	9,2	44,5
C_a (microfarads)	2,82	8,6	18,5
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_a}{C_r}$	1,37	1,32	1,40
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	3,5	10,8	22,6

CONDENSATEUR N° 3			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{S \omega}$	10,7	60	260
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin \alpha}{S \omega}$	10,5	60	260
$\frac{I}{R \omega}$	3,6	30,5	210
C_a (microfarads)	6,9	29,5	50
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_a}{C_r}$	3,55	5,1	3,8
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	7,2	30	50

Il ne faut accorder aux chiffres ci-dessus qu'une importance relative ; par suite de l'incertitude avec laquelle on connaît la résistance on ne peut déterminer que très grossièrement la capacité totale C et l'angle de pertes par viscosité pure lorsque la fréquence devient trop faible. Toutefois, on peut tirer des essais précédents certaines indications :

Lorsque la fréquence devient de plus en plus basse, les deux composantes de la capacité croissent énormément, l'angle de pertes par viscosité reste à peu près constant, l'angle de pertes totales vers 90° .

C. Moyenne fréquence. — Pour les fréquences industrielles, j'ai utilisé la décharge directe du condensateur dans un balistique muni ou non d'une bobine de compensation et d'un aimant. Je n'ai pu descendre facilement au-dessous de la fréquence 0,01 p/s parce que la décharge dure alors trop longtemps ; je n'ai pas, d'autre part, dépassé la fréquence 150 car déjà, dans ces conditions, le cycle est fort aplati et la précision insuffisante.

J'ai également effectué des mesures au pont ; la capacité et les pertes des condensateurs étudiés étant considérables, j'ai employé la méthode de Wien non modifiée. J'ai été limité vers le bas dans l'échelle des fréquences par la valeur énorme que doivent avoir les résistances et par la faible sensibilité obtenue. La plus haute fréquence étudiée correspond en général à l'onde fondamentale et à la vitesse maximum de mon alternateur ; je

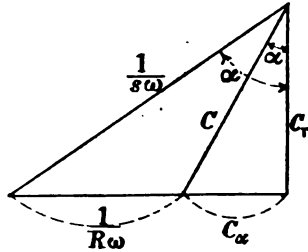


Fig. 32.

n'ai fait résonner un harmonique que dans un cas particulier, pour le condensateur n° 4 dont l'angle de perte semblait passer par un minimum.

Je citerai les résultats obtenus avec un certain nombre de très mauvais condensateurs pour lesquels l'influence de la fréquence est particulièrement nette :

Condensateur n° 2	papier paraffiné,	fabrication industrielle.
— n° 3	— —	fabriqué au laboratoire.
— n° 4	— —	fabrication industrielle.
— n° 12	papier imprégné à la vaseline.	
— n° 17	— —	à la cire.

Les premiers tableaux indiquent les nombres qui ont servi au tracé des cycles ; après les avoir résumés brièvement, je passerai aux résultats obtenus au pont.

Pour chaque condensateur, on a tracé 8 cycles sous une tension maximum de 100 volts ; les pulsations ω sont évaluées en radians par seconde, les tensions instantanées en volts et les charges correspondantes en microcoulombs.

CONDENSATEUR N° 2 (Balistique)

$\omega = 0.059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
38 cr.	— 175	— 2 cr.	— 13
85	— 3	26	— 3
99	112	70	17
97 décr.	228	95	32
80	262	92 décr.	39
54	288	71	37
28	281	35	27
13	246	3	13
— 5	232		
$\omega = 0.3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
24 cr.	— 106	5 cr.	— 6,5
52	— 33	39	2
74	— 5	70	10,6
94	26	95	20,3
96 décr.	150	91 décr.	25,8
72	176	69	23,1
44	178	35	14,8
1	144	2	7,2
$\omega = 0.81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
25 cr.	— 50	10 cr.	— 1,2
52	— 8	49	5
86	51	81	10,3
95	72	95	14,2
83 décr.	122	96 décr.	17,5
62	129	70	14,8
36	117	35	10,2
6	95	— 3	3,3
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5 cr.	— 21	3 cr.	— 0,3
35	— 5	35	1,3
72	18	81	7
91	35	93	8,5
96 décr.	55	97 décr.	9,7
80	53	65	6,8
46	44	24	2,8
0	24	0	0,7

CONDENSATEUR N° 3 (Balistique)

$\omega = 0.059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 5 cr.	— 2 960	— 2 cr.	— 17
28	— 2 870	26	— 12,5
71	— 1 750	70	— 0,6
97	— 720	95	17,1
96 décr.	1 980	92 décr.	28,2
74	2 820	71	29,8
54	3 010	35	26
21	2 910	3	18,2
— 3	2 960		
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 770	5 cr.	— 9,2
34	— 745	39	— 4,6
72	— 380	70	0,2
98	315	95	8,2
89 décr.	710	91 décr.	18,5
65	790	69	19,8
41	790	35	16,5
3	770	2	10,5
$\omega = 0.81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 380	10 cr.	— 5,1
31	— 320	49	1,2
82	— 130	81	6,8
95	16	95	10,2
93 décr.	330	96 décr.	12,6
72	395	70	11,7
31	395	35	9,5
2	365	— 3	6,1
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 3 cr.	— 40,5	3 cr.	— 2,8
31	— 31	35	0,2
69	— 9,5	81	4,1
94	38	93	5,5
97 décr.	81	97 décr.	7,9
72	93	65	7
49	102	24	4,6
5	84	0	3,1

CONDENSATEUR N° 4 (Balistique)

$\omega = 0,059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 4 cr.	— 1 030	0 cr.	— 13,5
40,7	— 885	35	36
76	— 472	58	70
83,5	— 174	84	109
96 décr.	523	98	140
65	920	93 décr.	141
26	920	61	97
0	984	7,5	25,5
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,3 cr.	— 380	0 cr.	— 4
45	— 324	31	35
72	— 185	55	78
88	— 102	90	117
97 décr.	274	98 décr.	135
72	350	70	111
41	384	48	57
0	384	—3,5	1
$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 236	4 cr.	0
26	— 215	41	48
61	— 148	65	83
95	5	82	121
98	171	94 décr.	129
72 décr.	308	75	103
31,5	285	39	40
— 2,5	215	0	3,5
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3	— 62	0 cr.	— 3,5
39	23	39	47
83	114	56	82
96	170	96	128
96 décr.	225	95 décr.	124
72	202	61	86
28	114	40	51
— 2	58,5	2	4

Des mesures précédentes, j'ai déduit :
 La capacité en microfarads C ;
 L'angle de perte par viscosité pure α en degrés ;
 Les pertes W en ergs par seconde correspondant à 1 volt efficace.
 Ces quantités sont contenues dans le tableau suivant :

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
$\omega = 980$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.97 \\ \sin \alpha = 0.07 \\ \alpha = 4^\circ \\ W = 67 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.08 \\ \sin \alpha = 0.40 \\ \alpha = 23^\circ \\ W = 314 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.02 \\ \alpha = 1^\circ \\ W = 255 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.92 \\ \sin \alpha = 0.04 \\ \alpha = 2^\circ 30' \\ W = 755 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.45 \\ \sin \alpha = 0.1 \\ \alpha = 6^\circ \\ W = 440 \end{array} \right.$
$\omega = 195$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.175 \\ \sin \alpha = 0.19 \\ \alpha = 11^\circ \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.130 \\ \sin \alpha = 0.50 \\ \alpha = 30^\circ \\ W = 127 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.03 \\ \alpha = 2^\circ \\ W = 76 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.2 \\ \sin \alpha = 0.09 \\ \alpha = 5^\circ \\ W = 385 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.53 \\ \sin \alpha = 0.21 \\ \alpha = 12^\circ \\ W = 215^\circ \end{array} \right.$
$\omega = 74$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.26 \\ \sin \alpha = 0.27 \\ \alpha = 16^\circ 30' \\ W = 52 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.20 \\ \sin \alpha = 0.53 \\ \alpha = 32^\circ \\ W = 78 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.35 \\ \sin \alpha = 0.04 \\ \alpha = 2^\circ 30' \\ W = 40 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.5 \\ \sin \alpha = 0.25 \\ \alpha = 14^\circ \\ W = 460 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.65 \\ \sin \alpha = 0.32 \\ \alpha = 19^\circ \\ W = 158 \end{array} \right.$
$\omega = 36$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.4 \\ \sin \alpha = 0.27 \\ \alpha = 16^\circ 30' \\ W = 39 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.31 \\ \sin \alpha = 0.60 \\ \alpha = 37^\circ \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.42 \\ \sin \alpha = 0.1 \\ \alpha = 6^\circ \\ W = 51 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.7 \\ \sin \alpha = 0.19 \\ \alpha = 11^\circ \\ W = 185 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.75 \\ \sin \alpha = 0.30 \\ \alpha = 18^\circ \\ W = 81 \end{array} \right.$
$\omega = 4$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.56 \\ \sin \alpha = 0.43 \\ \alpha = 26^\circ \\ W = 9.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.05 \\ \sin \alpha = 0.75 \\ \alpha = 50^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.3 \\ \sin \alpha = 0.05 \\ \alpha = 20^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4.2 \\ \sin \alpha = 0.48 \\ \alpha = 29^\circ \\ W = 80 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.60 \\ \sin \alpha = 0.50 \\ \alpha = 30^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$
$\omega = 0.81$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.7 \\ \alpha = 45^\circ \\ W = 7.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 29 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.1 \\ \sin \alpha = 0.68 \\ \alpha = 43^\circ \\ W = 17 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7.25 \\ \sin \alpha = 0.86 \\ \alpha = 60^\circ \\ W = 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.5 \\ \sin \alpha = 0.80 \\ \alpha = 54^\circ \\ W = 22.5 \end{array} \right.$
$\omega = 0.3$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.8 \\ \sin \alpha = 0.8 \\ \alpha = 55^\circ \\ W = 4.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7.9 \\ \sin \alpha = 0.88 \\ \alpha = 85^\circ \\ W = 23 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.84 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^\circ \\ W = 11.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 8.75 \\ \sin \alpha = 0.87 \\ \alpha = 61^\circ \\ W = 22.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 5.9 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 16 \end{array} \right.$
$\omega = 0.059$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.9 \\ \sin \alpha = 0.8 \\ \alpha = 55^\circ \\ W = 1.4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 32 \\ \sin \alpha = 0.99 \\ \alpha = 82^\circ \\ W = 18 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 9.85 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^\circ \\ W = 5.9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 24.2 \\ \sin \alpha = 0.99 \\ \alpha = 82^\circ \\ W = 14.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 20 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 11 \end{array} \right.$

Voici maintenant les résultats obtenus au pont de Wien. (R et

R' représentent les bras du pont, r et C' la résistance et la capacité de comparaison, C la capacité étudiée, α l'angle de pertes totales correspondant à 1 volt efficace, et ω la pulsation en radians par seconde) :

(AU PONT)

$\omega = 1,8$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	51 000	impossible	120 000	100 000	150 000
R	100 000	—	100 000	68 000	100 000
r	200 000	—	120 000	165 000	230 000
C'	2	—	2	3	2
C	1,02	—	2,4	4,4	3
$\text{tg } \alpha$	0,72	—	0,43	0,90	0,83
α	36°	—	23°	42°	40°
W	8,55	—	15,5	40	26,8

$\omega = 10,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	40 000	51 000	90 000	100 000	58 000
R	103 000	100 000	100 000	83 000	100 000
r	30 000	110 000	8 600	14 000	24 500
C'	1,4	1	2	3	1,9
C	0,54	0,51	1,8	3,6	1,1
$\text{tg } \alpha$	0,44	1,15	0,18	0,45	0,49
α	24°	49°	10°	24°	26°
W	29,5	25,5	34,5	145	45,5

$\omega = 26,2$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	7 300	9 250	9 600	9 300	8 800
R	20 000	33 000	6 000	2 900	11 000
r	13 900	31 000	3 300	8 800	13 900
C'	1	1	1	1	1
C	0,39	0,28	1,6	3,2	0,8
$\text{tg } \alpha$	0,365	0,81	0,087	0,23	0,365
α	20°	39°	5°	13°	20°
W	32,5	36	37	185	65,5

$\omega = 44,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	3 850	1 000	5 850	10 000	6 100
R	11 000	9 200	4 000	3 550	8 200
r	6 900	16 000	1 400	4 500	8 000
C'	1	1	1	1	1
C	0,35	0,22	1,46	2,8	0,74
$\text{tg } \alpha$	0,305	0,70	0,062	0,20	0,35
α	17°	35°30'	3°30'	11°	19°30'
W	43	45	40	240	100

porter sans chauffer des tensions atteignant une centaine de volts. (1)

Considérons maintenant le pont ainsi obtenu dans le cas où, pour simplifier, les résistances R et R' ainsi que les capacités C et C' sont égales.

Le courant dans les résistances est en phase avec la tension d'alimentation. Si la capacité étudiée est parfaite, le courant dans les condensateurs est en quadrature avant avec cette même tension ; les tensions en A et D sont égales et le pont est en équilibre.

Si le condensateur étudié est imparfait, le courant qui traverse DB est, par cela même, légèrement retardé ; on rétablira l'équilibre si, comme dans la méthode de Wien, on retarde de la même quantité le courant dans ED au moyen d'une résistance.

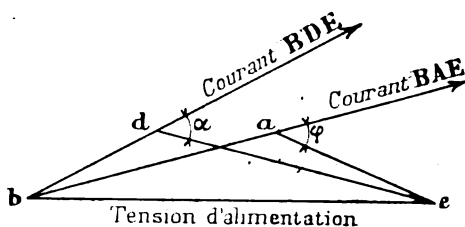


Fig 28.

Mais, et c'est là le point intéressant, on peut obtenir le même résultat en retardant le courant dans AB à l'aide d'une self-inductance ou en l'avancant dans EA au moyen d'une capacité (figure 28).

2° J'ai donc utilisé le dispositif suivant :

Un condensateur variable est placé en dérivation sur la résistance R' . Si γ est sa capacité actuelle, le déphasage φ du courant total sur la tension dans la branche EA est donné par :

$$\operatorname{tg} \varphi = \gamma R' \omega.$$

Lorsque le pont est en équilibre, ce déphasage φ du courant sur la tension dans la branche EA est égal en valeur absolue au déphasage α de la quantité d'électricité sur la tension dans la branche DB. L'angle de perte α du condensateur étudié est donc donné par $\operatorname{tg} \alpha = \gamma R' \omega$.

La capacité déduite de la formule $C = C'$ est non pas celle que

(1) Ces résistances de comparaison n'ont pas besoin d'être rigoureusement parfaites ; l'essentiel, c'est qu'elles soient affectées de la même manière par l'inductance et la capacité, ce qui est réalisé lorsqu'elles sont égales et bobinées de la même façon.

nous avons définie au balistique, mais celle que nous aurions obtenue par la méthode de Nernst.

La formule précédente montre que la capacité γ nécessaire pour obtenir l'équilibre ne dépend pas de la capacité du condensateur étudié mais dépend seulement des résistances du pont et de l'angle de perte. Avec un condensateur dont la capacité peut varier de 0,05 à 1 m μ F, et avec les valeurs 500, 2 000 et 10 000 ohms choisies pour les résistances, je puis mesurer à la fréquence 900 des angles de perte dont les tangentes sont comprises entre

$$10^{-9} \cdot 10^4 \cdot 2 \pi \cdot 900 = 0,06 \quad \text{et} \quad 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 2 \pi \cdot 900 = 0,00015.$$

A la fréquence de 50 p/s la valeur de 1 m μ F est insuffisante pour γ ; n'ayant pas à ma disposition de capacité variable beau-

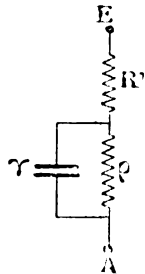


Fig. 29.

coup plus importante, je l'ai remplacée par un condensateur de 1 μ F shunté par une résistance z selon le schéma de la figure 29 ; dans ces conditions $\tan \alpha$ est donné par la formule :

$$\tan \alpha = \frac{z^2 \gamma \omega}{R (1 + z^2 \gamma^2 \omega^2) + z}.$$

Les pertes dans γ et la capacité de z n'ayant sur le résultat qu'une influence négligeable, j'ai pris pour γ un condensateur à mica et pour z une boîte de résistances ordinaire.

E. Précautions indispensables. — Pour la réalisation pratique du pont, j'ai pris enfin un certain nombre de précautions, afin d'éviter toute capacité parasite.

En premier lieu, tous les appareils étaient maintenus à une vingtaine de centimètres au-dessus de la table par des tubes de verre verticaux, les condensateurs variables étaient manœuvrés à distance au moyen de longs manches d'ébonite. Enfin deux condensateurs de 1 μ F étaient montés en série sur la tension d'alimentation et leur borne commune était à la terre.

Pour augmenter la sensibilité ⁽¹⁾ et rendre plus négligeable encore l'action des capacités parasites, je donnais autant que possible à mes condensateurs des capacités supérieures à 1 m μ F.

A la fréquence 900 p/s avec des résistances $R = R' = 2\,000$ ohms, une tension d'alimentation de 50 volts, des condensateurs de 3 m μ F, protégés contre toute capacité parasite et des écouteurs de 4 000 ohms, j'obtenais une approximation supérieure au millièrne pour la capacité et de l'ordre du centième pour les pertes. Le réglage des condensateurs C' et γ durait une quinzaine de secondes.

V. MÉTHODE DE RÉSONANCE. — A. Principe. — Un condensateur avec pertes est, à fréquence constante, assimilable à l'ensemble d'un condensateur parfait et d'une résistance. Pour mesurer cette

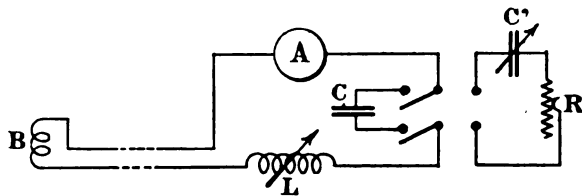


Fig. 30.

dernière, il suffit donc de compenser la capacité par une self-inductance satisfaisant à l'équation $CL\omega^2 = 1$.

La résistance R équivalente aux pertes se déduit alors de la loi d'Ohm : $I = \frac{E}{R}$.

Malheureusement, il n'existe pas de self-inductance parfaite et des pertes ainsi obtenues, il faut soustraire les pertes dans la bobine.

Celles-ci dépendent d'un grand nombre de facteurs (effet de peau, effet de bobinage, etc.), très difficile à évaluer. Aussi est-on conduit à opérer par substitution.

On forme donc un circuit oscillant (fig. 30), avec le condensateur étudié C , une inductance variable L , un ampèremètre et une bobine qui permet un couplage lâche avec un générateur d'ondes entretenues. On agit sur la bobine L jusqu'à ce que l'on obtienne à l'ampèremètre la déviation maximum.

(¹) Lorsque la sensibilité est nettement insuffisante, on peut utiliser un amplificateur à lampes.

On remplace alors le condensateur étudié par un condensateur de capacité variable C' à air ⁽¹⁾ en série avec une résistance variable R ; sans toucher à L on fait varier C' et R jusqu'à ce que, à la résonance, l'intensité soit la même que dans le premier cas. La capacité du condensateur étudié est alors $C = C'$ et son angle de perte est déterminé par : $\operatorname{tg} \alpha = C'R \omega$.

B. Indicateur de résonance. — Le couplage devant être assez lâche pour que la résonance soit nette, l'intensité dans le circuit oscillant est relativement faible. Les ampèremètres thermiques ordinaires ne sont sensibles que pour des courants supérieurs au centième d'ampère et encore ont-ils pour cette sensibilité une forte résistance, une vingtaine d'ohms généralement ; pour des fréquences élevées, leur emploi est à peu près impossible parce que c'est en eux que se trouve la principale cause d'amortissement du circuit oscillant.

L'emploi de couples thermoélectriques est, au contraire, tout indiqué. Celui dont je me servais avait une résistance de 2 ohms environ ; comme il jouait simplement le rôle d'indicateur de résonance, je ne l'avais pas étalonné.

Je ne désirais pas une précision excessive dans mes mesures, mais plutôt un montage simple, autant que possible à l'abri d'erreurs systématiques. Aussi n'ai-je pas utilisé une intéressante méthode de zéro due à Bairsto ⁽²⁾ et dont il convient de rappeler le principe :

On oppose la f.e.m. thermoélectrique à une tension variable prise sur un potentiomètre ; on règle celui-ci pour que, à la résonance, un galvanomètre intercalé dans le circuit reste au zéro. On obtient ainsi une grande sensibilité.

Bairsto utilisait d'ailleurs un commutateur tournant qui permutait rapidement le condensateur étudié et l'étalon ; en série avec chacun d'eux se trouvait un thermocouple et c'est la différence de leurs échauffements qu'il mesurait. Cette dernière disposition, nécessaire lorsque les ondes sont produites par un générateur à arc forcément instable, est tout à fait inutile quand on emploie un générateur aussi régulier que des tubes électroniques et ne peut alors être qu'une source de complications et d'erreurs.

⁽¹⁾ Si l'on craint que le condensateur à air ne soit pas parfait, comme ses pertes sont indépendantes de sa capacité actuelle, on peut le laisser connecté en permanence, mais en le laissant au zéro.

⁽²⁾ BAIRSTO. *Proceedings of the Royal Society*, 1920, vol. XCVI, p. 363.

C. *Résistances.* — La résistance qu'il faut mettre en série (1) avec le condensateur à air pour obtenir le même amortissement qu'avec le condensateur étudié est relativement faible. Pour une capacité de 1 m.f.r et une longueur d'onde de 1 000 mètres, sa valeur est :

5 ohms, pour $\operatorname{tg} \alpha = 0,01$ et 0,5 ohms, pour $\operatorname{tg} \alpha = 0,001$

La construction de telles résistances est aisée et l'on n'a pas, en général, à craindre l'influence du « skin effect ». En effet, le rapport entre la résistance R_1 en alternatif et la résistance R en continu ne dépend, à fréquence constante, que de la résistance linéaire et est égal, pour des matériaux non magnétiques à :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 l^2}{12 R^2} \text{ en unités c. g. s.}$$

En unités pratiques, en faisant apparaître le diamètre d du fil et sa résistivité ρ il vient :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 d^4}{19,5 \cdot 10^{18} \rho^2}$$

Pour que l'influence du « skin effect » soit inférieure à 1 pour 100 à la fréquence 300 000 p.s il faut que

$$\frac{4 \pi^2 \cdot 9 \cdot 10^{10} \cdot d^4}{19,5 \cdot 10^{18} \cdot \rho^2} < 10^{-2} \text{ ou } d < 15 \sqrt{\rho}$$

ce qui donne comme diamètre maximum :

0,2 mm pour le cuivre ;

0,45 mm pour le platine ;

1,5 mm pour le mercure ;

1 mm pour le constantan supposé non magnétique.

La longueur correspondante, indépendante de la nature du métal est environ 2 mètres pour 1 ohm.

Il convient de se tenir bien au-dessous des valeurs précédentes, mais on ne doit pas adopter le fil le plus fin que l'on ait à sa disposition, parce qu'il conduirait à des longueurs beaucoup trop petites, difficiles à mesurer et à fractionner. Avec du fil de 500 ohms par mètre, par exemple, il suffirait, pour une résistance de 1 ohm, de 2 mm de long ; même si l'on se contentait d'une approximation de 5 pour 100, il faudrait pouvoir faire varier la longueur de ce fil par fractions d'un dixième de millimètre, ce qui est extrêmement délicat. Au contraire, avec du fil de 50 ohms

(1) Bairsto mettait en dérivation sur le condensateur à air une résistance variable à eau.

au mètre, il suffit de faire varier la longueur millimètre par millimètre (*).

D. *Couplage par capacité parasite.* — Une erreur systématique importante peut provenir de la capacité de fuite des condensateurs étudiés. Le condensateur du circuit en résonance produit des lignes de force ; toutes celles qui émanent d'une armature ne vont pas forcément tomber directement sur l'autre ; les unes vont aboutir aux murs de la salle ou à la table d'expériences, les autres au condensateur du circuit générateur d'ondes. Il s'ensuit qu'au couplage magnétique entre les deux circuits se superpose un couplage électrostatique (**). Si par exemple la capacité de fuite du condensateur étudié est plus grande que celle de l'étalon et si, d'autre part, le couplage électrostatique tend à renforcer le couplage électromagnétique, on devra, pour obtenir la même intensité à la résonance, augmenter la résistance de comparaison et, par suite, l'angle de perte observé sera supérieur à l'angle de perte réel.

De plus, les lignes de force qui aboutissent aux murs et à la table se ferment à travers de très mauvais diélectriques et introduisent un amortissement supplémentaire dans le circuit de résonance ().

Pour ces deux raisons, les mesures ne peuvent être correctes que si le condensateur étudié et le condensateur étalon ont des capacités de fuite identiques ; le procédé le plus efficace pour obtenir ce résultat consiste à enfermer les condensateurs dans des boîtes métalliques identiques et disposées de la même façon.

Comme dans la méthode du pont, j'ai dû éloigner tous les appareils utilisés à une vingtaine de centimètres de la table et les commander par de longs manches en ébonite. La zone de résonance étant fort étroite et les mesures n'étant légitimes qu'à la résonance exacte, j'ai dû employer un variomètre et un condensateur à air d'une extrême sensibilité. Le circuit de résonance était convenablement éloigné du circuit excitateur.

(*) On y arrive aisément en constituant à l'avance des cavaliers interchangeables, formés de fils de constantan soudés à deux gros fils de cuivre et en les plongeant dans deux godets remplis de mercure. On peut, d'ailleurs, obtenir une approximation supérieure en procédant par interpolation.

(**) Pour voir si ce couplage existe, il suffit d'inverser les pôles du condensateur en résonance ; le couplage par capacité change alors de signe.

(*) La masse du galvanomètre restant à un potentiel sensiblement constant, il peut se produire également des pertes (MESNY, *Onde électrique*, mai 1922) dans l'isolant du fil, mais elles n'ont ici aucune importance, puisqu'elles subsistent pour les deux condensateurs.

CHAPITRE IV

CAUSES DIVERSES INFLUANT SUR LES PERTES

I. INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE. — A. *Généralités.* — Un grand nombre d'auteurs ont étudié l'action de la fréquence sur les pertes dans les diélectriques, mais les résultats ont tout d'abord varié beaucoup avec la méthode employée.

Au début, on a utilisé le courant d'une machine statique périodiquement interrompu par des étincelles ; le diélectrique était alors soumis à une série de décharges oscillantes ; dans ces conditions, il était naturel de constater un échauffement proportionnel à la fréquence des étincelles, c'est-à-dire au nombre de trains d'onde.

On a ensuite évalué les pertes en planimétrant le cycle de viscosité, mais celui-ci était obtenu au moyen de balistiques à périodes d'oscillation trop courtes qui n'enregistraient pas convenablement les décharges lentes. Il en résulte qu'à très basse fréquence, la surface des cycles était considérablement réduite. Mercanton a trouvé ainsi que la perte par cycle passait par un maximum pour une fréquence voisine de 1 p.s.

Plus récemment quelques expériences systématiques ont été entreprises. Les résultats obtenus par Fleming et Dicke (pont, fréquence téléphonique), Bouzon (méthode calorimétrique, haute fréquence), Mesny et Schott (méthode de résonance, haute fréquence), indiquent des pertes sensiblement proportionnelles à la fréquence.

Il ne convient d'accepter les résultats précédents que comme une première approximation, l'intervalle des fréquences utilisées étant relativement peu étendu.

Une étude plus complète a été faite par Bairsto en haute fréquence ; il a trouvé que dans le cas de bons isolants, les pertes passaient par un maximum très net pour une certaine fréquence voisine de 600 000 p.s. Toutefois, certaines de ses expériences gagneraient à être reprises et pourraient ainsi bénéficier des progrès réalisés durant ces dernières années par les tubes à 3 électrodes.

J'ai pensé que pour dégager des expériences une loi générale, il fallait opérer sur une échelle de fréquence beaucoup plus étendue. Mes essais ont porté sur des fréquences comprises entre 0,00029 p.s et 65 000 000 p.s. Les différentes méthodes de mesure n'étant pratiquement utilisables que dans une zone de fréquences

relativement restreinte, j'ai dû employer successivement plusieurs montages.

A très basse fréquence, j'ai utilisé une méthode dérivant de l'oscillographe. Pour des fréquences basses, moyennes et téléphoniques, j'ai étudié au pont des condensateurs de grande capacité (dans le but d'accroître la sensibilité et de faire disparaître certaines sources d'erreur) ; j'ai d'ailleurs contrôlé les résultats au balistique. Enfin, à haute fréquence, j'ai renoncé en général à la méthode de résonance, trop délicate pour des essais à fréquence variable pour utiliser la méthode calorimétrique, plus longue, moins sensible, mais plus sûre.

Comme on le verra dans la suite, les divers condensateurs que l'on peut former avec un même diélectrique ont généralement

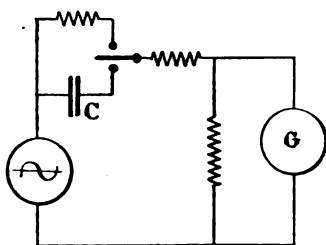


Fig. 31.

des propriétés bien différentes et, dès lors, l'étude particulière d'un échantillon n'offre qu'un intérêt secondaire. Ce que je me suis proposé surtout dans les paragraphes suivants, c'est l'amélioration des procédés de mesure et la discussion des résultats expérimentaux.

B. Très basse fréquence. — A fréquence très basse, l'usage du balistique devient pénible. Il faut, en effet, un assez grand nombre de points pour déterminer le cycle de viscosité et, pour chacun d'eux, on doit laisser s'effectuer plusieurs périodes ; chaque décharge demande également un temps fort long. Enfin, le balistique ne donne aucune précision sur l'angle de perte qu'il détermine par son sinus très voisin de l'unité.

La méthode oscillographique présente, pour ces fréquences, l'avantage d'être très simple. Voici le dispositif que j'ai employé :

La source à courant alternatif alimente en série le condensateur à étudier et une résistance ; en dérivation sur celle-ci est branché un galvanomètre à indications très rapides dont on règle la sensibilité et l'amortissement au moyen d'une résistance

en série et d'un shunt. Pour repérer la phase, on dispose sur l'axe de l'appareil une came qui fait fonctionner un timbre chaque fois qu'elle repasse par la même position.

Au début, on remplace momentanément le condensateur par une résistance, puis on fait tourner lentement la cuve à eau acidulée jusqu'à ce que le timbre se fasse entendre quand le spot est au zéro. Le réglage étant ainsi effectué, on remet le condensateur en place et l'on note la déviation β_0 quand le timbre se fait entendre et la déviation maximum β . Si l'étalonnage a donné une déviation θ pour le courant qui traverse I mégohm alimenté sous le $\frac{1}{n}$ de la tension normale, on en déduit immédiatement :

$$\text{L'impédance } s = \frac{n \theta}{\beta} \text{ mégohms ;}$$

L'angle des pertes totales $\cos \alpha' = \frac{\beta_0}{\beta}$ (si n est le même dans les deux cas) ;

$$\text{La capacité réactive } C_r = \frac{\beta_0}{\omega n \theta} \text{ microfarads.}$$

Les essais ont porté sur des condensateurs à papier paraffiné ; comme ces fréquences sont relativement peu intéressantes, je donne seulement les résultats relatifs à deux condensateurs ; les pulsations ω sont exprimées en radians par seconde, les capacités en microfarads :

CONDENSATEUR N° 2							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	53,5	25	3,08	0,47	2,08
0,0087	6,2	183	186	64	6,1	0,345	6,50
0,0018	6,2	183	130	27	8,7	0,208	13,2
CONDENSATEUR N° 3							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	129	23,7	1,28	0,184	1,94
0,0087	1	165	86		1,92		
0,0087	6,2	183		57		0,097	5,80
0,0018	1	165	77		2,14		
0,0018	6,2	183		27,5		0,052	13,5

J'ai déjà indiqué que l'essai à l'oscillographe devait être complété par une mesure de résistance en courant continu. Mais, dès à présent, il est possible de tirer des résultats précédents une conclusion intéressante : *la capacité réactive augmente énormément quand la fréquence diminue.*

Pour déterminer la capacité totale C telle que je l'ai définie au

balistique et l'angle de pertes par viscosité pure z , j'ai effectué un essai en courant continu. La résistance d'isolement obtenue a été :

$R = 12,5$ mégohms pour le condensateur n° 2.

$R = 2,65$ mégohms pour le condensateur n° 3.

En utilisant les relations géométriques simples données par la figure 32, j'ai alors calculé les nombres suivants :

CONDENSATEUR N° 2			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{s \omega}$	4,4	18,9	64
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin z'}{s \omega}$	3,90	17,8	63
$\frac{I}{R \omega}$	1,08	9,2	44,5
C_a (microfarads)	2,82	8,6	18,5
$\operatorname{tg} z = \frac{C_a}{C_r}$	1,37	1,32	1,40
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	3,5	10,8	22,6

CONDENSATEUR N° 3			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{s \omega}$	10,7	60	260
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin z'}{s \omega}$	10,5	60	260
$\frac{I}{R \omega}$	3,6	30,5	210
C_a (microfarads)	6,9	29,5	50
$\operatorname{tg} z = \frac{C_a}{C_r}$	3,55	5,1	3,8
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	7,2	30	50

Il ne faut accorder aux chiffres ci-dessus qu'une importance relative ; par suite de l'incertitude avec laquelle on connaît la résistance on ne peut déterminer que très grossièrement la capacité totale C et l'angle de pertes par viscosité pure lorsque la fréquence devient trop faible. Toutefois, on peut tirer des essais précédents certaines indications :

Lorsque la fréquence devient de plus en plus basse, les deux composantes de la capacité croissent énormément, l'angle de pertes par viscosité reste à peu près constant, l'angle de pertes totales vers 90° .

C. Moyenne fréquence. — Pour les fréquences industrielles, j'ai utilisé la décharge directe du condensateur dans un balistique muni ou non d'une bobine de compensation et d'un aimant. Je n'ai pu descendre facilement au-dessous de la fréquence 0,01 p.s parce que la décharge dure alors trop longtemps ; je n'ai pas, d'autre part, dépassé la fréquence 150 car déjà, dans ces conditions, le cycle est fort aplati et la précision insuffisante.

J'ai également effectué des mesures au pont ; la capacité et les pertes des condensateurs étudiés étant considérables, j'ai employé la méthode de Wien non modifiée. J'ai été limité vers le bas dans l'échelle des fréquences par la valeur énorme que doivent avoir les résistances et par la faible sensibilité obtenue. La plus haute fréquence étudiée correspond en général à l'onde fondamentale et à la vitesse maximum de mon alternateur ; je

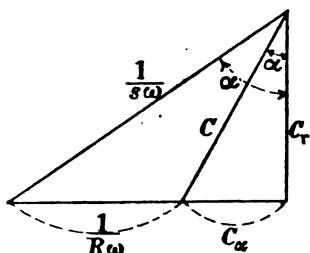


Fig. 32.

n'ai fait résonner un harmonique que dans un cas particulier, pour le condensateur n° 4 dont l'angle de perte semblait passer par un minimum.

Je citerai les résultats obtenus avec un certain nombre de très mauvais condensateurs pour lesquels l'influence de la fréquence est particulièrement nette :

Condensateur n° 2	papier paraffiné,	fabrication industrielle.
— n° 3 — —	fabriqué au laboratoire.	
— n° 4 — —	fabrication industrielle.	
— n° 12	papier imprégné à la vaseline.	
— n° 17 — —	à la cire.	

Les premiers tableaux indiquent les nombres qui ont servi au tracé des cycles ; après les avoir résumés brièvement, je passerai aux résultats obtenus au pont.

Pour chaque condensateur, on a tracé 8 cycles sous une tension maximum de 100 volts ; les pulsations ω sont évaluées en radians par seconde, les tensions instantanées en volts et les charges correspondantes en microcoulombs.

CONDENSATEUR N° 2 (Balistique)

$\omega = 0.059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
38 cr.	— 175	— 2 cr.	— 13
85	— 3	26	— 3
99	112	70	17
97 décr.	228	95	32
80	262	92 décr.	39
54	288	71	37
28	281	35	27
13	246	3	13
— 5	232		
$\omega = 0.3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
24 cr.	— 106	5 cr.	— 6,5
52	— 33	39	2
74	— 5	70	10,6
94	26	95	20,3
96 décr.	150	91 décr.	25,8
72	176	69	23,1
44	178	35	14,8
1	144	2	7,2
$\omega = 0.81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
25 cr.	— 50	10 cr.	— 1,2
52	— 8	49	5
86	51	81	10,3
95	72	95	14,2
83 décr.	122	96 décr.	17,5
62	129	70	14,8
36	117	35	10,2
6	95	— 3	3,3
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5 cr.	— 21	3 cr.	— 0,3
35	— 5	35	1,3
72	18	81	7
91	35	93	8,5
96 décr.	55	97 décr.	9,7
80	53	65	6,8
46	44	24	2,8
0	24	0	0,7

CONDENSATEUR N° 3 (Ballistique)

$\omega = 0,059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 5 cr.	— 2 960	— 2 cr.	— 17
28	— 2 870	26	— 12,5
71	— 1 750	70	— 0,6
97	— 720	95	17,1
96 décr.	1 980	92 décr.	28,2
74	2 820	71	29,8
54	3 010	35	26
21	2 910	3	18,2
— 3	2 960		
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 770	5 cr.	— 9,2
34	— 745	39	— 4,6
72	— 380	70	0,2
98	315	95	8,2
89 décr.	710	91 décr.	18,5
65	790	69	19,8
41	790	35	16,5
3	770	2	10,5
$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 380	10 cr.	— 5,1
31	— 320	49	1,2
82	— 130	81	6,8
95	16	95	10,2
93 décr.	330	96 décr.	12,6
72	395	70	11,7
31	395	35	9,5
2	365	— 3	6,1
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 3 cr.	— 40,5	3 cr.	— 2,8
31	— 31	35	0,2
69	— 9,5	81	4,1
94	38	93	5,5
97 décr.	81	97 décr.	7,9
72	93	65	7
49	102	24	4,6
5	84	0	3,1

CONDENSATEUR N° 4 (Balistique)

$\omega = 0,059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 4 cr.	— 1 030	0 cr.	— 13,5
40,7	— 885	35	36
76	— 472	58	70
83,5	— 174	84	109
96 décr.	523	98	140
65	920	93 décr.	141
26	920	61	97
0	984	7,5	25,5
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,3 cr.	— 380	0 cr.	— 4
45	— 324	31	35
72	— 185	55	78
88	— 102	90	117
97 décr.	274	98 décr.	135
72	350	70	111
41	384	48	57
0	384	—3,5	1
$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 236	4 cr.	0
26	— 215	41	48
61	— 148	65	83
95	5	82	121
98	171	94 décr.	129
72 décr.	308	75	103
31,5	285	39	40
— 2,5	215	0	3,5
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3	— 62	0 cr.	— 3,5
39	23	39	47
83	114	56	82
96	170	96	128
96 décr.	225	95 décr.	124
72	202	64	86
28	114	40	51
— 2	58,5	2	4

CONDENSATEUR N° 12 (Balistique)

$\omega = 0,09$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 1 cr.	— 2 640	10 cr.	— 58,5
42,3	— 1 720	52	62
74,5	— 1 060	75	145
94,5	— 905	94	238
96 décr.	1 520	89 décr.	263
63	2 420	68	252
26	2 380	40	275
4,4	2 400	5	88
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,5 cr.	— 780	0 cr.	— 81,5
52,2	— 435	41	27,5
74	— 196	74	135
92	42,5	95	218
96,5 décr.	620	99 décr.	250
71,5	873	91	247
35	871	64,5	210
4,4	770	5	77
$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 585	— 5 cr.	— 32
26	— 465	28	44
61	— 186	72	240
95	215	96	204
98 décr.	445	94 décr.	213
72	715	66	158
31	723	31	89
— 2	603	2	25
$\omega = 1$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3 cr.	— 232	5 cr.	0
39	— 121	42	76
83	72	80	155
96	176	96	192
96 décr.	370	81 décr.	191
72	415	66	140
26	307	31	75
— 2	192	1	10

CONDENSATEUR N° 17 (Balistique)

$\omega = 0.059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 1 cr.	— 1 860	0 cr.	— 27
42,3	— 1 790	35	— 3,5
74,5	— 1 550	58	16
94,5	— 825	84	40,5
96 décr.	1 040	98	64
63	1 880	93 décr.	74
26	2 030	61	61
4,4	1 820	7,5	25,5
$\omega = 0.3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,5 cr.	— 520	0 cr.	— 21
52,2	— 365	31	0
74	— 225	55	17
92	— 43	90	49
96,5 décr.	310	98 décr.	64
71,5	538	70	56
35	590	48	46,5
4,4	570	— 3	16
$\omega = 0.81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 314	4 cr.	— 8,5
26	— 270	41	12
61	— 192	65	28
95	33	92	44
98 décr.	215	94 décr.	52,5
72	325	75	45
31	340	39	29
— 2	274	0	11
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3 cr.	— 45,5	0 cr.	— 3,5
39	— 19,5	39	15
83	39	56	23
96	71,5	96	42,3
96 décr.	122	95 décr.	44
72	158	64	30,5
26	75	40	20,4
— 2	52	2	5

Des mesures précédentes, j'ai déduit :
 La capacité en microfarads C ;
 L'angle de perte par viscosité pure α en degrés ;
 Les pertes W en ergs par seconde correspondant à 1 volt efficace.
 Ces quantités sont contenues dans le tableau suivant :

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
$\omega = 980$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.97 \\ \sin \alpha = 0.07 \\ \alpha = 4^\circ \\ W = 67 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.08 \\ \sin \alpha = 0.40 \\ \alpha = 23^\circ \\ W = 314 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.02 \\ \alpha = 1^\circ \\ W = 255 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.92 \\ \sin \alpha = 0.04 \\ \alpha = 2^\circ 30' \\ W = 755 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.45 \\ \sin \alpha = 0.1 \\ \alpha = 6^\circ \\ W = 440 \end{array} \right.$
$\omega = 195$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.175 \\ \sin \alpha = 0.19 \\ \alpha = 11^\circ \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.130 \\ \sin \alpha = 0.50 \\ \alpha = 30^\circ \\ W = 127 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.03 \\ \alpha = 2^\circ \\ W = 76 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.2 \\ \sin \alpha = 0.09 \\ \alpha = 5^\circ \\ W = 385 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.53 \\ \sin \alpha = 0.21 \\ \alpha = 12^\circ \\ W = 215^\circ \end{array} \right.$
$\omega = 74$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.26 \\ \sin \alpha = 0.27 \\ \alpha = 16^\circ 30' \\ W = 52 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.20 \\ \sin \alpha = 0.53 \\ \alpha = 32^\circ \\ W = 78 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.35 \\ \sin \alpha = 0.04 \\ \alpha = 2^\circ 30' \\ W = 40 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.5 \\ \sin \alpha = 0.25 \\ \alpha = 14^\circ \\ W = 460 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.65 \\ \sin \alpha = 0.32 \\ \alpha = 19^\circ \\ W = 158 \end{array} \right.$
$\omega = 36$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.4 \\ \sin \alpha = 0.27 \\ \alpha = 16^\circ 30' \\ W = 39 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.31 \\ \sin \alpha = 0.60 \\ \alpha = 37^\circ \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.42 \\ \sin \alpha = 0.1 \\ \alpha = 6^\circ \\ W = 51 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.7 \\ \sin \alpha = 0.19 \\ \alpha = 11^\circ \\ W = 185 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.75 \\ \sin \alpha = 0.30 \\ \alpha = 18^\circ \\ W = 81 \end{array} \right.$
$\omega = 4$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.56 \\ \sin \alpha = 0.43 \\ \alpha = 26^\circ \\ W = 9.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.05 \\ \sin \alpha = 0.75 \\ \alpha = 50^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.3 \\ \sin \alpha = 0.05 \\ \alpha = 20^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4.2 \\ \sin \alpha = 0.48 \\ \alpha = 29^\circ \\ W = 80 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.60 \\ \sin \alpha = 0.50 \\ \alpha = 30^\circ \\ W = 32 \end{array} \right.$
$\omega = 0.81$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.3 \\ \sin \alpha = 0.7 \\ \alpha = 45^\circ \\ W = 7.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 29 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.1 \\ \sin \alpha = 0.68 \\ \alpha = 43^\circ \\ W = 17 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7.25 \\ \sin \alpha = 0.86 \\ \alpha = 60^\circ \\ W = 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.5 \\ \sin \alpha = 0.80 \\ \alpha = 54^\circ \\ W = 22.5 \end{array} \right.$
$\omega = 0.3$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1.8 \\ \sin \alpha = 0.8 \\ \alpha = 55^\circ \\ W = 4.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7.9 \\ \sin \alpha = 0.88 \\ \alpha = 80^\circ \\ W = 23 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3.84 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^\circ \\ W = 11.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 8.75 \\ \sin \alpha = 0.87 \\ \alpha = 61^\circ \\ W = 22.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 5.9 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 16 \end{array} \right.$
$\omega = 0.059$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2.9 \\ \sin \alpha = 0.8 \\ \alpha = 55^\circ \\ W = 1.4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 32 \\ \sin \alpha = 0.99 \\ \alpha = 82^\circ \\ W = 18 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 9.85 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^\circ \\ W = 5.9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 24.2 \\ \sin \alpha = 0.99 \\ \alpha = 82^\circ \\ W = 14.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 20 \\ \sin \alpha = 0.92 \\ \alpha = 67^\circ \\ W = 11 \end{array} \right.$

Voici maintenant les résultats obtenus au pont de Wien. (R et

R' représentent les bras du pont, r et C' la résistance et la capacité de comparaison, C la capacité étudiée, α l'angle de pertes totales correspondant à 1 volt efficace, et ω la pulsation en radians par seconde) :

(AU PONT)

$\omega = 1,8$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	51 000	impossible	120 000	100 000	150 000
R	100 000	—	100 000	68 000	100 000
r	200 000	—	120 000	165 000	230 000
C'	2	—	2	3	2
C	1,02	—	2,4	4,4	3
$\text{tg } \alpha$	0,72	—	0,43	0,90	0,83
α	36°	—	23°	42°	40°
W	8,55	—	15,5	40	26,8

$\omega = 10,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	40 000	51 000	90 000	100 000	58 000
R	103 000	100 000	100 000	83 000	100 000
r	30 000	110 000	8 600	14 000	24 500
C'	1,4	1	2	3	1,9
C	0,54	0,51	1,8	3,6	1,1
$\text{tg } \alpha$	0,44	1,15	0,18	0,45	0,49
α	24°	49°	10°	24°	26°
W	29,5	25,5	34,5	145	45,5

$\omega = 26,2$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	7 300	9 250	9 600	9 300	8 800
R	20 000	33 000	6 000	2 900	11 000
r	13 900	31 000	3 300	8 800	13 900
C'	1	1	1	1	1
C	0,39	0,28	1,6	3,2	0,8
$\text{tg } \alpha$	0,365	0,81	0,087	0,23	0,365
α	20°	39°	5°	13°	20°
W	32,5	36	37	185	65,5

$\omega = 44,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	3 850	1 000	5 850	10 000	6 100
R	11 000	9 200	4 000	3 550	8 200
r	6 900	16 000	1 400	4 500	8 000
C'	1	1	1	1	1
C	0,35	0,22	1,46	2,8	0,74
$\text{tg } \alpha$	0,305	0,70	0,062	0,20	0,35
α	17°	35°30'	3°30'	11°	19°30'
W	43	45	40	240	100

(AU PONT)

$\omega = 90,5$						
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17	
R'	1 300	1 670	4 900	5 610	3 510	
R	3 750	9 900	3 470	2 500	5 500	
r	3 400	7 100	570	1 600	3 000	
C'	1	1	1	1	1	
C	0,26	0,17	1,41	2,24	0,64	
$lg \alpha$	0,308	0,64	0,051	0,145	0,27	
α	17°	32°30'	3°	8°20'	15°	
W	67	70	65	290	145	

$\omega = 222$						
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17	
R'	1 900	1 320	5 040	4 320	2 550	
R	10 500	11 000	3 700	2 000	4 700	
r	1 210	2 750	160	430	950	
C'	1	1	1	1	1	
C	0,18	0,12	1,35	2,15	0,54	
$lg \alpha$	0,265	0,60	0,035	0,096	0,21	
α	15°	31°	2°	5°30'	12°	
W	97	115	103	460	240	

$\omega = 340$						
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17	
R'	1 800	1 070	3 950	5 910	2 100	
R	10 200	10 500	2 900	2 250	4 000	
r	615	1 510	85	150	550	
C'	1	1	1	1	1	
C	0,175	0,102	1,36	2,10	0,52	
$lg \alpha$	0,21	0,51	0,029	0,076	0,153	
α	12°	28°	1°40'	4°20'	8°40'	
W	120	140	133	540	220	

$\omega = 1020$						
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17	
R'	1 565	905	540	408	350	
R	11 000	11 000	400	195	735	
r	140	450	20	52	102	
C'	1	1	1	1	1	
C	0,142	0,082	1,35	2,1	0,48	
$lg \alpha$	0,143	0,46	0,0205	0,053	0,10	
α	8°10'	24°40'	1°10'	3°	5°10'	
W	205	320	280	1 130	470	

(AU PONT)

$\omega = 1620$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	505	200	1 075	1 700	377
R	3 712	3 100	810	809	817
r	64	220	10	29	43
C'	1	1	1	1	1
C	0,136	0,064	1,33	2,11	0,46
$\operatorname{tg} \alpha$	0,104	0,36	0,016	0,047	0,07
α	6°	20°	1°	2°40'	4°
W	230	375	342	1 600	520

$\omega = 2980$			$\omega = 2050$ (¹)		
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	665	335	352	1 700	420
R	5 015	5 700	465	818	920
r	32	112	5	24	30
C'	1	1	1	1	1
C	0,133	0,059	1,32	2,07	0,46
$\operatorname{tg} \alpha$	0,095	0,33	0,015	0,049	0,062
α	5°25'	18°	1°	2°50'	3°30'
W	385	525	590	2 080	580

$\omega = 5610$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	200	200	390	400	430
R	1 571	3 640	300	196	950
r	15	55	5	9	8
C'	1	1	1	1	1
C	0,127	0,055	1,30	2,05	0,45
$\operatorname{tg} \alpha$	0,084	0,31	0,028	0,05	0,045
α	4°50'	17°	1°35'	2°50'	2°30'
W	600	870	2 040	5 750	1 130

$\omega = 16500$

Condensateur n° 4: $C = 1,28$ $\operatorname{tg} \alpha = 0,053$ $\alpha = 3^\circ$ $W = 11\,200$

D. Haute fréquence. — Les essais à haute fréquence ont été effectués au calorimètre par la méthode déjà indiquée. Sous tension constante, l'intensité et par suite l'échauffement, varient considérablement avec la fréquence ; les pertes par rayonnement qui sont proportionnelles à l'échauffement croissent dans les mêmes

(¹) La rupture d'une courroie a empêché de terminer l'essai à la même fréquence.

proportions, mais le rapport entre la chaleur perdue et la chaleur dégagée reste constant pour une même durée d'essai. Cette remarque montre que le même étalonnage reste valable, quel que soit l'échauffement, pourvu qu'on ne change pas la durée de l'expérience.

Mais, il ne peut en être ainsi lorsque l'intervalle des fréquences étudiées est considérable. Aux fréquences les plus basses, l'échauffement doit déjà être suffisant pour que la lecture au thermomètre se fasse avec assez de précision ; pour les hautes fréquences, il ne doit pas être exagéré, sans quoi les qualités du diélectrique pourraient se trouver modifiées ; pratiquement, il doit rester compris entre 0,1 et 1 degré.

Pour ramener l'échauffement à une valeur convenable, on peut évidemment agir sur la tension ; je n'ai pas procédé ainsi, craignant que ces variations de tension n'aient quelque influence sur l'angle de perte. J'ai préféré modifier la durée de l'essai ou la capacité calorifique du condensateur ; j'obtenais ce dernier résultat en remplissant plus ou moins le tube de liquide ou en remplaçant l'eau par du pétrole ; naturellement, l'étalonnage était alors à recommencer.

La source de courant était un alternateur pour 900 p:s, un générateur à lampes pour les autres fréquences.

La tension était mesurée à l'électromètre, l'intensité au thermocouple ou à l'ampèremètre thermique.

Mon ondemètre permettait des lectures directes entre $\lambda = 1\ 000\text{ m}$ ($f = 300\ 000\text{ p:s}$) et $\lambda = 2\ 500\text{ m}$ ($f = 120\ 000\text{ p:s}$) en lui adjoignant deux capacités supplémentaires, je pouvais l'amener à la résonance pour $\lambda = 5\ 000\text{ m}$ ($f = 60\ 000\text{ p:s}$) et $\lambda = 7\ 000\text{ m}$ ($f = 43\ 000\text{ p:s}$) ; je ne pouvais utiliser cet appareil pour $\lambda = 23\ 000\text{ m}$ ($f = 12\ 600\text{ p:s}$) et j'ai dû construire de toutes pièces un circuit de contrôle. Les fréquences 60 000 et 43 000 p:s ont été étalonnées sur les émissions de la Tour Eiffel, celle de 12 600 p:s sur celles de Bordeaux-Croix d'Hins.

Entre 300 000 et 120 000 p:s, le condensateur étudié était seul en circuit et sa capacité déterminait la longueur d'onde ; dans les autres cas, la fréquence m'était fixée à l'avance et, pour l'obtenir, je doublais le condensateur étudié d'une capacité variable.

Il faut remarquer que dans cette méthode (au contraire de ce qui a lieu au pont et dans la méthode de résonance), la fréquence n'a pas besoin d'être connue avec une grande précision.

Je n'ai pu opérer sur les mêmes condensateurs que précédemment, à cause de l'intensité considérable qu'ils auraient absorbée pour ces fréquences ; ceux que j'ai étudiés avaient une capacité environ mille fois plus faible. Ils m'ont donné les résultats suivants :

CIRE					
	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	640	0,00182	20	0°24
	12 600	450	0,0178	4	0°157
	143 000	465	0,205	4	1°14
Etalonnages	continu	0,287	0,035	20	0°25
	continu	1,25	0,150	4	1°03
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,24}{0,25} \times \frac{0,287}{640} \times \frac{0,035}{0,00182} = 0,0083$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,157}{1,03} \times \frac{1,25}{450} \times \frac{0,150}{0,0178} = 0,0036$				
	Pour $f = 143\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,14}{1,03} \times \frac{1,25}{465} \times \frac{0,150}{0,205} = 0,0022$				

MICA

(La capacité calorifique, réduite au minimum pour $f = 900$ p:s et pour $f = 12\,600$ p:s a été augmentée pour $f = 152\,000$ p:s).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	450	0,00179	30	0°144
	12 600	655	0,0366	6	0°71
	152 000	660	0,435	2	1°18
Etalonnages	continu	0,147	0,0173	30	0°22
	continu	0,553	0,065	6	0°66
	continu	1,70	0,201	2	1°08
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,144}{0,22} \times \frac{0,147}{450} \times \frac{0,0173}{0,00179} = 0,00206$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,71}{0,66} \times \frac{0,553}{655} \times \frac{0,065}{0,0366} = 0,0016$				
	Pour $f = 152\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,18}{1,08} \times \frac{1,70}{660} \times \frac{0,201}{0,435} = 0,0013$				

TOILE HUILÉE

(légèrement séchée. La capacité calorifique a été augmentée pour la fréquence 242 000 p:s).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	193	0,000475	15	0°173
	12 600	178	0,0061	15	1°61
	242 000	169	0,108	2	1°14
Etalonnages	continu	0,191	0,0462	15	0°275
	continu	1,68	0,405	2	1°04
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,173}{0,275} \times \frac{0,191}{193} \times \frac{0,0462}{0,000475} = 0,061$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,61}{0,275} \times \frac{0,191}{178} \times \frac{0,0462}{0,0061} = 0,0475$				
	Pour $f = 242\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,14}{1,04} \times \frac{1,68}{169} \times \frac{0,405}{0,108} = 0,041$				

PRESSPAHN

(Séché à l'étuve. La capacité calorifique a été réduite au minimum pour les fréquences 900 et 12 600 p.s ; elle a été augmentée pour la fréquence 227 000 p.s).

	Fréquence p.s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	423	0,000703	15	0°112
	12 600	408	0,0094	15	1°38
	227 000	375	0,152	2	1°29
Etalonnages	continu	0,208	0,0225	15	0°135
	continu	2,45	0,268	2	1°17
Résultats	Pour $f=900$ p.s $\sin z = \frac{0,112}{0,135} \times \frac{0,208}{423} \times \frac{0,0225}{0,000703} = 0,0133$				
	Pour $f=12\,600$ p.s $\sin z = \frac{0,135}{1,30} \times \frac{0,208}{408} \times \frac{0,0225}{0,0094} = 0,0132$				
	Pour $f=227\,000$ p.s $\sin z = \frac{1,29}{117} \times \frac{2,45}{375} \times \frac{0,268}{0,152} = 0,0127$				

VERRE

(Tube à essai, armature interne en mercure, armature externe en papier d'étain).

	Fréquence p.s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	265	0,00072	15	0°122
	60 000	208	0,0378	2	0°325
	12 600	223	0,00855	2	0°115
	193 000	210	0,121	2	0°895
Etalonnages	continu	0,26	0,0355	15	0°142
	continu	1,84	0,253	2	0°98
Résultats	Pour $f=900$ p.s $\sin z = \frac{0,122}{0,112} \times \frac{0,26}{265} \times \frac{0,0355}{0,00072} = 0,042$				
	Pour $f=12\,600$ p.s $\sin z = \frac{0,115}{0,95} \times \frac{1,84}{223} \times \frac{0,253}{0,00855} = 0,0255$				
	Pour $f=60\,000$ p.s $\sin z = \frac{0,325}{0,98} \times \frac{1,84}{208} \times \frac{0,253}{0,0378} = 0,0197$				
	Pour $f=193\,000$ p.s $\sin z = \frac{0,895}{0,98} \times \frac{1,84}{210} \times \frac{0,253}{0,121} = 0,0168$				

PAPIER CIRÉ

	Fréquence p.s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	218	0,00076	8	0°217
	12 600	178	0,0077	2	0°128
	43 000	185	0,0260	2	0°285
	205 000	172	0,115	2	0°75
Etalonnages	continu	0,304	0,062	8	0°188
	continu	1,05	0,215	2	0°58
Résultats	Pour $f=900$ p.s $\sin z = \frac{0,217}{0,188} \times \frac{0,304}{218} \times \frac{0,062}{0,00076} = 0,131$				
	Pour $f=12\,600$ p.s $\sin z = \frac{0,128}{0,58} \times \frac{1,05}{185} \times \frac{0,215}{0,0077} = 0,0365$				
	Pour $f=43\,000$ p.s $\sin z = \frac{0,285}{0,58} \times \frac{1,05}{185} \times \frac{0,215}{0,0260} = 0,023$				
	Pour $f=205\,000$ p.s $\sin z = \frac{0,75}{0,58} \times \frac{1,05}{172} \times \frac{0,215}{0,115} = 0,0148$				

CAOUTCHOUC

	Fréquence p.s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	254	0,00087	15	0°152
	12 600	263	0,0125	2	0°23
	43 000	248	0,0392	2	0°495
	143 000	236	0,123	2	1°34
Etalonnages	continu	0,270	0,0445	15	0°197
	continu	1,95	0,325	2	1°42
Résultats	Pour $f=900$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,152}{0,197} \times \frac{0,270}{254} \times \frac{0,0445}{0,00087} = 0,0417$				
	Pour $f=12\,600$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,23}{1,42} \times \frac{1,95}{263} \times \frac{0,325}{0,0125} = 0,315$				
	Pour $f=43\,000$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,495}{1,42} \times \frac{1,95}{247} \times \frac{0,325}{0,0392} = 0,0228$				
	Pour $f=143\,000$ p.s $\sin \alpha = \frac{1,34}{1,42} \times \frac{1,95}{236} \times \frac{0,325}{0,123} = 0,0206$				

BUVARD
(humidité du laboratoire)

	Fréquence p.s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	183	0,00047	15	0°245
	12 600	161	0,00525	2	0°145
	60 000	164	0,0233	2	0°495
	288 000	148	0,093	2	1°19
Etalonnages	continu	0,285	0,048	15	0°185
	continu	2,05	0,345	2	1°25
Résultats	Pour $f=900$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,245}{0,185} \times \frac{0,285}{183} \times \frac{0,048}{0,00047} = 0,211$				
	Pour $f=12\,600$ p.s $\sin \alpha = \frac{1,19}{1,25} \times \frac{2,05}{148} \times \frac{0,345}{0,00325} = 0,0955$				
	Pour $f=60\,000$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,495}{1,25} \times \frac{2,05}{161} \times \frac{0,345}{0,233} = 0,072$				
	Pour $f=288\,000$ p.s $\sin \alpha = \frac{0,145}{1,25} \times \frac{2,05}{161} \times \frac{0,345}{0,093} = 0,049$				

E. Très haute fréquence. — Enfin, j'ai effectué quelques mesures à très haute fréquence ; ne pouvant, dans ces conditions, mesurer commodément la tension, j'ai dû abandonner la méthode calorimétrique et opérer par résonance. Pour diminuer les erreurs systématiques, j'ai adopté un montage aussi simple que possible.

Les ondes étaient produites par une lampe à trois électrodes dans les circuits de laquelle la capacité et l'inductance avaient été réduites au minimum. Deux fils parallèles couplés lâchement avec cet oscillateur, étaient le siège de phénomènes stationnaires qui permettaient de déterminer la longueur d'onde.

Le circuit de mesure consistait essentiellement en un cadre A B C D de 12 cm de côté (fig. 32 bis). Entre A et B étaient inter-

calés en c tantôt le condensateur à étudier, tantôt un étalon à air ; le côté BC contenait une lampe à incandescence sensible à une fraction de volt ; enfin, le côté AD était démontable et pouvait être remplacé par une résistance r formé d'un fil rectiligne de maillechort de 0,03 mm de diamètre soudé à 2 gros fils de cuivre.

Pour faire une mesure, je réunissais A et D par un gros fil de cuivre, j'introduisais en c le condensateur à étudier et je faisais varier ses dimensions jusqu'à obtenir la résonance ; la lampe prenait alors un certain éclat que je repérais avec une lampe identique alimentée par un accumulateur à travers un rhéostat réglable. Ensuite, *sans changer le couplage*, je remplaçais le condensateur étudié par le condensateur à air dont je réglais la capacité pour obtenir à nouveau la résonance. Enfin, en intro-

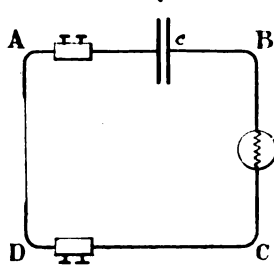


Fig. 32 bis.

duisant dans le côté AD une résistance convenable r , j'arrivais par tâtonnements à donner à la lampe le même éclat que dans la première opération.

Dans ces conditions, l'angle de perte est donné par la relation : $\operatorname{tg} \alpha = cr\omega$. Je n'ai pas cherché à déterminer d'une manière systématique les pouvoirs inducteurs ; je me suis borné à vérifier qu'ils étaient de l'ordre de grandeur prévu.

Pour des fréquences aussi élevées, il est évidemment illusoire de compter sur une grande précision ; le skin effect en particulier est de l'ordre de 10 pour cent avec les résistances employées. Malgré cela, on peut effectuer d'intéressantes mesures relatives.

	c farads	λ mètres	r ohms	$\operatorname{tg} \alpha$
Toile huilée	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	8	0,035
Caoutchouc	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	12	0,05
Ebonite	$1,10 \cdot 10^{-11}$	4,70	5	0,025

Les angles de perte correspondant à cette fréquence sont de l'ordre de grandeur de ceux que j'avais obtenus pour les fréquences utilisées en radiotélégraphie.

J'ai étudié ensuite quelques liquides :

	C farads	λ mètres	r ohms	$\lg \alpha$
Eau distillée ordinaire	$1,10 \cdot 10^{-11}$	4,70	4	0,02
Eau de la ville	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	25	0,12
Glace d'eau de la ville	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	18	0,09
Alcool ordinaire	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	11	0,05
Nitrobenzine	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	3	0,015

Ces mesures ont été complétées par un essai en courant continu sous 340 volts. Voici les résistances de fuite obtenues et les angles de perte α' que l'on en déduirait en haute fréquence si les pertes étaient exclusivement dues aux fuites.

	Résistance de fuites	$\lg \alpha'$
Eau distillée ordinaire	38 000	0,006
Eau de la ville	650	0,50
Alcool ordinaire	20 000	0,01
Nitrobenzine	500 000	0,0005

Ces tableaux montrent d'abord que l'eau et l'alcool, même impurs, ne sont pas, pour ces fréquences, de trop mauvais isolants. On y voit également que, pour la nitrobenzine, une viscosité bien nette se superpose à la conductibilité. Enfin, on y remarque ce résultat à première vue paradoxal, que les pertes sont, pour l'eau de la ville, bien inférieures à celles que l'on déduirait de la valeur des fuites mesurées en courant continu (¹) ; cela provient, semble-t-il, de ce que la conductibilité des électrolytes diminue quand la fréquence augmente, le mouvement des ions n'étant pas instantané (²).

Des considérations théoriques sur lesquelles je reviendrai m'ont amené ensuite à faire quelques expériences sur la glycérine.

Les premiers essais m'ont montré que les condensateurs à glycérine n'entraient que difficilement en résonance et m'ont donné comme résultat :

$$C = 1,05 \cdot 10^{-11} \text{ farads} \quad \lambda = 4,70 \text{ mètres} \quad r = 90 \text{ ohms} \quad \lg \alpha = 0,43.$$

Pour vérifier l'existence de ces pertes énormes, j'ai fait des mélanges à proportions variables d'eau et de glycérine.

Proportion de glycérine en centièmes	C farads	λ mètres	r ohms	$\lg \alpha$
50	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	25	0,125
80	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	40	0,20
95	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	65	0,32

Ces résultats confirment le précédent.

(¹) Il y a lieu de remarquer que les capacités qui interviennent dans le calcul de ces deux angles de perte ne correspondent pas à la même définition.

(²) ANDRÉ BROCA et TURCHINI (*Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, 1901, t. CXXXII, p. 915) ont montré que pour des fréquences suffisantes (10%), on peut obtenir dans des électrolytes des étincelles tout comme dans les diélectriques.

En courant continu, le condensateur étudié avait une résistance de 2 300 000 ohms ; ces fuites correspondaient à un angle de perte défini par $\text{tg } \alpha = 0,0001$.

Enfin, j'ai fait un essai à une fréquence relativement faible, pour $\lambda = 1\,800$ m. Alors que l'eau et l'alcool étaient, par suite

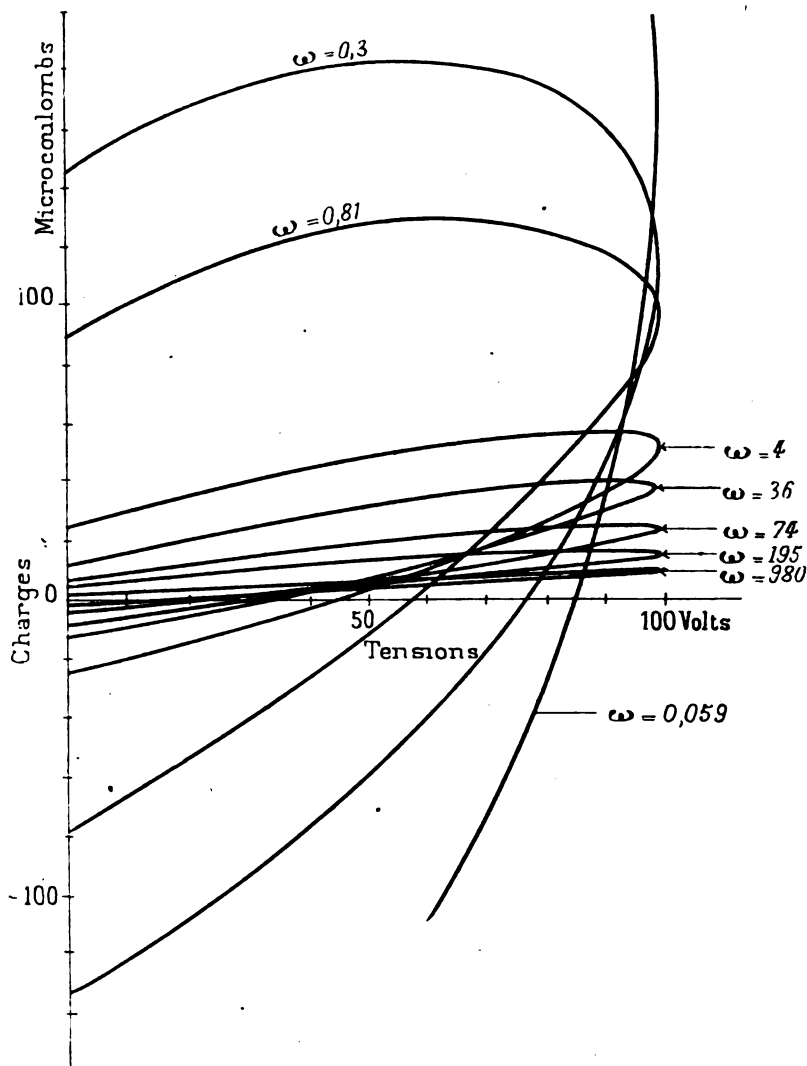


Fig. 33.

de leur conductibilité, tellement absorbants qu'il était impossible de mettre en évidence la moindre résonance, la glycérine permettait d'obtenir une résonance particulièrement nette et son angle de perte était défini par $\text{tg } \alpha = 0,025$.

Ainsi, la glycérine qui se comporte généralement comme un très bon isolant présente, pour des longueurs d'onde de quelques mètres, une région d'absorption tout à fait nette.

F. Conclusion. — Les résultats les plus intéressants sont, à mon avis, ceux qu'a donnés la méthode du balistique, parce qu'ils se

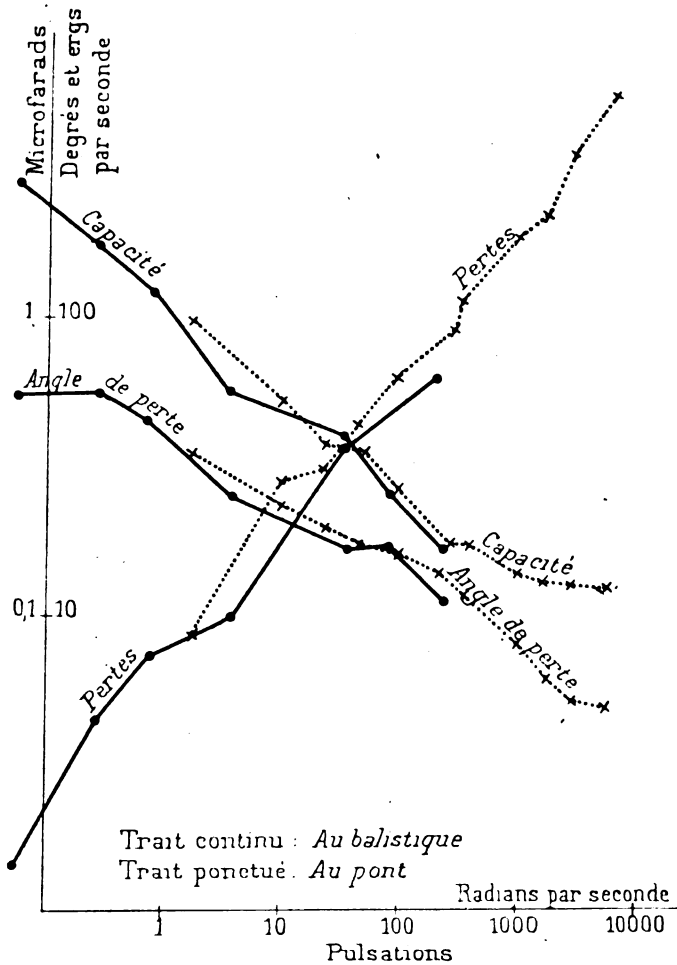


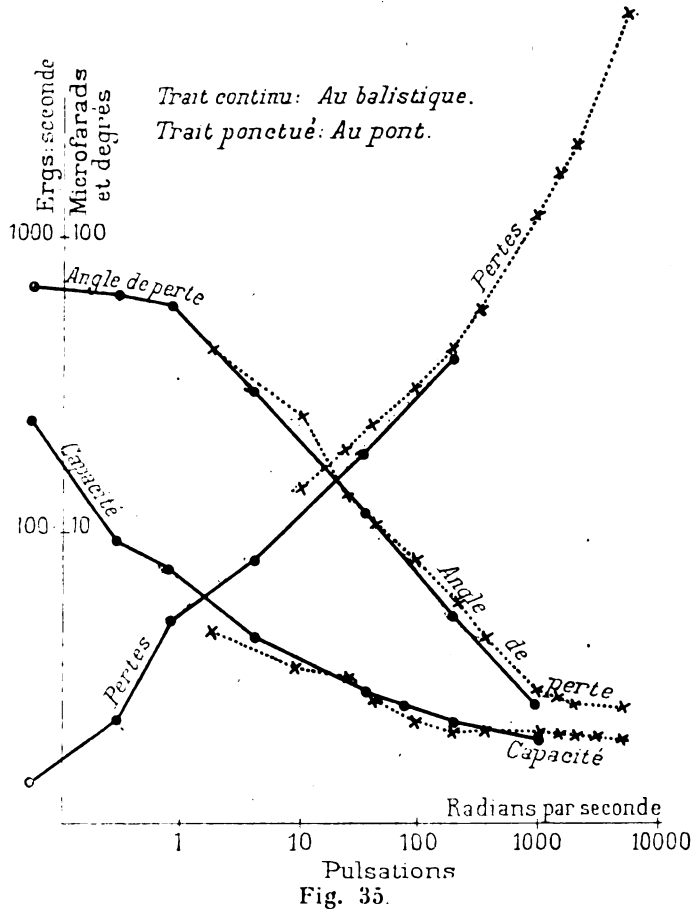
Fig. 34.

rapportent aux pertes par viscosité pure. J'ai représenté sur la figure 33 les cycles obtenus ; leur aspect montre sans aucune ambiguïté que la perte par cycle décroît constamment lorsque la fréquence augmente.

Pour dégager des résultats une loi générale, j'ai représenté sur les figures 34 et 35 ceux qui sont relatifs aux condensateurs n° 2

et 12, en adoptant des coordonnées logarithmiques pour faciliter les lectures aux basses fréquences.

On voit en premier lieu que les résultats obtenus au pont ne sont pas très différents, en général, de ceux que fournit le balistique, de sorte que la perte due aux fuites apparaît comme négli-



geable ; dans les quelques cas où l'écart entre leurs valeurs est notable, c'est que l'une des deux méthodes est à la limite de sa sensibilité. Pour des cycles très aplatis par exemple, on ne peut mesurer l'angle de perte au balistique qu'avec une faible approximation ; par contre, aux basses fréquences, l'équilibre ne peut être obtenu au pont que d'une manière approchée.

En coordonnées logarithmiques, les courbes représentatives des pertes sont sensiblement rectilignes ; elles peuvent donc être représentées par des relations de la forme $W = M \omega^n$ où M et n

sont des constantes. L'exposant n prend la valeur 0,5 pour le condensateur n° 2 et la valeur 0,6 pour le n° 12 ; la puissance absorbée par ces deux mauvais condensateurs croît donc bien moins vite que la fréquence. La surface du cycle de viscosité et l'angle de perte diminuent rapidement lorsque la fréquence augmente ; ces condensateurs sont donc d'autant meilleurs que la fréquence est plus élevée.

La capacité varie en sens inverse de la fréquence, mais suivant une loi plus compliquée. Pour des fréquences très basses, lorsque les résidus sont énormes, la courbe représentative est sensiblement rectiligne, mais elle s'infléchit peu à peu à mesure que la fréquence augmente. On obtient un résultat beaucoup plus simple en représentant non plus la capacité totale, mais seulement la capacité résiduelle ; la courbe représentative est alors une droite dont le coefficient angulaire est sensiblement $n-1$. La capacité totale peut donc être représentée par l'expression suivante : $C = C_0 + N \omega^{n-1}$.

Le sinus de l'angle de perte, qui est proportionnel au quotient des pertes par le courant est alors de la forme : $\sin \alpha = \frac{A}{B + C_0 \omega^{1-n}}$.

Lorsque la fréquence devient de plus en plus basse, C_0 est pour de mauvais condensateurs négligeable devant B , de sorte que l'angle de perte par viscosité tend vers une limite ; naturellement, l'angle de pertes totales tend vers $\frac{\pi}{2}$.

Le condensateur n° 4 semble faire exception aux lois précédentes. Pour les fréquences moyennes et basses, il ne se distingue pas des autres, mais, aux environs de $\omega = 2\,000$, son angle de perte passe par un minimum. Un essai spécial fait à $\omega = 16\,500$ m'a confirmé ce résultat. J'ai pensé que cette anomalie pouvait provenir de la résistance des armatures et, pour vérifier cette hypothèse, j'ai, à la fin des expériences, démonté les condensateurs n° 2 et 4. J'ai effectivement constaté que les bornes du condensateur n° 2 étaient réunies en divers points aux armatures, tandis que ces connexions n'existaient pas pour le condensateur n° 4 ; les armatures de ce dernier, constituées par une feuille d'étain de 4,50 m de long sur 2 cm de large et $\frac{1}{100}$ mm d'épaisseur, avaient une résistance totale de 2,4 ohms, ce qui suffit pour expliquer la recrudescence de l'angle de perte aux fréquences élevées.

Au début de la haute fréquence, les résultats précédents sub-

sistent en général, comme le montre la fig. 36. L'angle de perte est sensiblement indépendant de la fréquence pour le presspahn et la toile huilée ; il décroît au contraire nettement pour le buvard, le papier ciré et la cire. Mes mesures en haute fréquence ne sont pas, d'ailleurs, assez précises pour que l'on puisse en déduire suivant quelle loi varie la capacité ; elles montrent cependant que, sauf pour le buvard et le papier ciré, cette variation ne dépasse pas 5 pour 100.

Enfin, à très haute fréquence, apparaît, pour la glycérine en particulier, un phénomène tout à fait distinct soumis à des règles entièrement différentes.

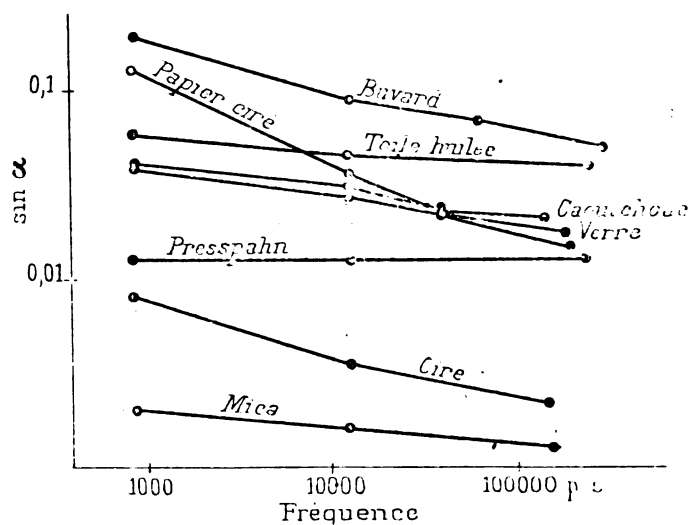


Fig. 36.

Les lois précédentes ne doivent être considérées que comme une première approximation, largement suffisante d'ailleurs. Il ne semble pas possible de représenter les pertes par des formules plus précises sans qu'elles cessent d'être générales. Pour certains corps même, comme la gutta, les pertes varient tellement suivant l'échantillon étudié et les traitements thermiques antérieurs, qu'il semble illusoire de vouloir les représenter mathématiquement.

II. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — A. Généralités. — Parmi les causes qui font varier les propriétés des diélectriques imparfaits, l'action de la température est une des plus importantes ; elle a été étudiée en particulier par Fleming et Dicke (pont, fré-

quence téléphonique) ; Skinner (wattmètre électrostatique, basse fréquence), Swingedauw, Renesson, Frigon (wattmètre électrodynamique, basse fréquence) ; Schott ⁽¹⁾ (résonance, haute fréquence). Il ressort de leurs expériences que, en général, les pertes sont une fonction rapidement croissante de la température. Toutefois, pour le caoutchouc, la gutta et la résine, il existe un minimum plus ou moins net.

La principale difficulté rencontrée provient de ce qu'un diélectrique chauffé puis refroidi ne revient pas à son état initial. Il ne faut pas entendre par là qu'il existe dans tous les cas une hystérésis véritable dans l'action de la température, car les modifications du diélectrique sont dues à des causes trop complexes; j'ai constaté en particulier les suivantes :

1° Dans le verre, corps en surfusion, l'arrangement moléculaire après chauffage ne revient que lentement à son état primitif ; on connaît d'ailleurs depuis longtemps le déplacement du zéro des thermomètres. J. Curie a montré aussi que la capacité d'un condensateur à verre sous tension constante est plus grande après la chauffe qu'avant.

2° Dans un condensateur à papier paraffiné, lorsqu'on arrive aux environs de 110° on constate ordinairement une ébullition quelquefois tumultueuse ; l'humidité du diélectrique s'échappe et, après refroidissement, le condensateur est bien meilleur qu'auparavant.

3° Dans les condensateurs à armatures de clinquant et diélectriques organiques, il y a quelquefois attaque chimique fort nette; le sel de cuivre formé se répand dans la masse et détermine une augmentation des pertes.

4° Enfin, quand le chauffage détermine dans le diélectrique un changement d'état, il se produit des dilatations ou des compressions de sorte que les dimensions géométriques peuvent être modifiées si les armatures ne sont pas rigides.

C'est surtout la première fois que le diélectrique est chauffé, que ses propriétés se modifient. Par exemple, un condensateur à papier paraffiné avait primitivement à 22° et à 25 p.s un angle de perte dont la tangente était 0,38 ; après 2 heures de chauffe à 110° cette quantité est tombée à 0,05 ; après 3 chauffages successifs, elle est remontée à 0,08.

(1) SCHOTT. *Zeitschrift für Drahtlose Telegraphie*. Band 18, p. 62, 1921.

Avant tout essai électrique, on doit donc faire subir au condensateur plusieurs chauffages successifs, identiques comme durée et température à ceux que l'on utilisera pour les mesures. Il faut en outre chauffer lentement, les diélectriques étant mauvais conducteurs de la chaleur, pour être sûr que toute la masse est à la même température. Enfin, si l'on doit comparer les résultats obtenus pour des fréquences ou des tensions différentes, on doit, autant que possible, faire les mesures pendant le même essai.

B. *Condensateurs à papier imprégné.* — J'exposerai d'abord les expériences faites sur des condensateurs à papier imprégné. Leur capacité considérable m'a permis de les étudier à basse fréquence ; j'en ai profité pour comparer entre elles les méthodes du pont, du wattmètre et du balistique.

1° Les premiers essais ont été faits au pont de Wien ; les condensateurs étaient chauffés à l'étuve et la température était maintenue constante pendant une heure avant les mesures. Celles-ci m'ont montré que les pertes étaient une fonction rapidement croissante de la température. Cette augmentation est due à la fois à un accroissement de l'angle de perte et à un accroissement de la capacité. Voici les chiffres obtenus (R et R' représentent les bras du pont, r et C' la résistance et la capacité de comparaison, C la capacité étudiée, α l'angle de pertes totales, P_a pertes totales correspondant à 1 volt efficace, et ω la pulsation en radians par seconde) :

CONDENSATEUR N° 2 (papier paraffiné)					
1 ^{re} série ($\omega = 33$)		$R = 10\,000$ ohms		$C' = 1\ \mu\text{F}$	
Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\text{tg } \alpha$	P_a ergs/sec.
— 7°	2 300	10 900	0,23	0,39	27
8°	2 720	11 800	0,27	0,42	35
20°	3 300	14 000	0,33	0,46	41,5
32°	4 200	16 500	0,42	0,54	57,5
44°	7 800	30 000	0,78	1	130
50°	9 000	35 000	0,90	1,15	146
2 ^{me} série ($\omega = 140$)		$R' = 1\,000$ ohms		$C' = 1\ \mu\text{F}$	
— 7°	170	2 200	0,17	0,31	70
8°	230	2 570	0,23	0,36	103
20°	280	3 050	0,28	0,425	140
32°	485	3 600	0,367	0,505	270
44°	690	6 920	0,69	0,97	490
50°	800	7 100	0,80	1	550

CONDENSATEUR N° 3 (papier paraffiné)

1^{re} série ($\omega = 33$ $R = 1000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\lg z$	P_a ergs.sec.
— 6°	110	10 500	0,11	0,35	11,5
14°	240	23 000	0,24	0,76	37,5
21°	380	32 000	0,38	1,05	62
38°	850	70 000	0,85	2,30	102
55°	5 300	110 000	5,3	3,63	445

2^{me} série ($\omega = 140$ $R = 1000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\lg z$	P_a ergs.sec.
— 6°	82	1 950	0,08	0,27	28
14°	155	3 600	0,155	0,505	87
21°	225	6 090	0,225	0,86	155
38°	575	13 000	0,575	1,82	335
55°	3 800	22 700	3,8	3,2	1 520

CONDENSATEUR N° 17 (papier ciré)

1^{re} série ($\omega = 33$ $R = 1000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\lg z$	P_a ergs.sec.
— 6°	620	6 700	0,62	0,22	39
14°	710	9 600	0,71	0,31	62
21°	870	12 100	0,87	0,40	98
38°	1 250	20 000	1,25	0,66	188
55°	3 950	38 000	3,95	1,25	582

2^{me} série ($\omega = 140$ $R = 1000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\lg z$	P_a ergs.sec.
— 6°	455	1 280	0,455	0,18	115
14°	605	2 020	0,60	0,28	220
21°	730	2 600	0,73	0,365	325
38°	1 165	4 190	1,165	0,59	725
55°	2 550	8 090	2,55	1,13	1 550

2° Lorsque la température s'approche de celle de fusion, les pertes augmentent plus rapidement encore. Je me suis proposé de voir d'une manière plus précise ce qui se passe au moment de la fusion. Comme les essais précédents m'avaient montré les difficultés que présente le réglage du pont pour des angles de perte excessifs (1), j'ai préféré mesurer d'abord du wattmètre les puissances actives P_a et réactive P_r .

Voici les résultats obtenus pour le condensateur n° 2 :

(1) En se rapportant à la figure 24, on voit que les deux cercles dont l'intersection détermine les conditions d'équilibre du pont, se coupent sous un angle très aigu.

CONDENSATEUR N° 2 (wattmètre)

1^{re} série ($\omega = 38$)

Température	P_a ergs:sec. sous 1 volt	P_r ergs:sec. sous 1 volt	tg α
— 3°	5,6	62	0,09
10°	7,2	65	0,11
22°	7,8	65	0,12
35°	10,3	68	0,15
48°	14,4	72	0,20
52°	40	125	0,32
56°	92	205	0,45
62°	450	320	1,40
70°	570	332	1,75
80°	660	330	2
92°	1 020	330	3,1
103°	1 350	340	4

2^{me} série ($\omega = 157$)

— 3°	16	212	0,075
10°	19,3	215	0,09
22°	20,8	208	0,10
35°	25,5	214	0,12
48°	28	242	0,15
52°	65	285	0,23
56°	115	350	0,32
62°	560	405	1,4
70°	685	415	1,65
80°	830	405	2,05
92°	1 150	410	2,80
103°	1 520	420	3,60

3° Ces résultats montrent encore que les pertes croissent très rapidement avec la température, mais ils permettent aussi de faire quelques remarques intéressantes :

La puissance réactive reste sensiblement constante ou en tout cas ne croît que très lentement avant et après la fusion ; pendant celle-ci, elle augmente brusquement.

Avant la fusion, les puissances active et réactive dépendent beaucoup de la fréquence et on peut même dire en première approximation qu'elles lui sont proportionnelles ; après la fusion, elles en sont presque indépendantes.

De la première de ces remarques, il résulte que la capacité calculée par la formule $C = \frac{P_r}{\omega}$ semble dans cet essai ne croître

que très lentement après la fusion. Ce résultat m'ayant paru suspect et en contradiction avec les mesures d'autres auteurs, j'ai opéré sur des condensateurs différents : les résultats ont persisté.

J'ai alors incriminé le dispositif employé ; pour savoir si l'erreur provenait d'un choix défectueux des appareils de mesure ou encore des conditions de l'expérience, j'ai comparé la méthode du wattmètre à celle du pont. Comme on s'en rendra compte dans les tableaux ci-après relatifs au condensateur n° 10, les résultats sont sensiblement d'accord pour l'angle de perte, mais sont tout à fait en contradiction en ce qui concerne la capacité. A 100°, par exemple, pour $\omega = 41$, on trouve par interpolation $C = \frac{P_r}{\omega} = 3,4$

au wattmètre et $C = \frac{C' R'}{R} = 45$ au pont.

Pourtant, les deux méthodes ont donné sensiblement les mêmes valeurs pour les puissances active et réactive ou, ce qui revient au même, pour la valeur maximum du courant et son déphasage. Il ne peut donc y avoir d'erreur expérimentale ; le désaccord ne peut s'expliquer que par une inexactitude théorique. Il est alors facile de voir que les formules simples utilisées $C = \frac{P_r}{\omega}$ et $C = \frac{C' R'}{R}$

ne correspondent pas aux mêmes hypothèses sur la constitution des diélectriques. Dans la méthode du wattmètre on écrit que toute l'énergie réactive est emmagasinée sous la tension d'alimentation ; dans celle du pont, au contraire, on admet implicitement qu'elle est emmagasinée sous une tension égale à celle qui existe aux bornes du condensateur de comparaison.

On peut essayer des formules plus approchées ; en supposant que les fuites sont négligeables, on obtient la *capacité définie au balistique* en divisant par $\cos \alpha$ le nombre trouvé au wattmètre ou en multipliant par $\cos \alpha$ le nombre obtenu au pont. Aussi, ai-je calculé en même temps que les autres résultats les valeurs de

$\frac{P_r}{\omega \cos \alpha}$ et de $\frac{C' R'}{R} \cos \alpha$; on peut voir que, effectivement, elles sont

peu différentes dans les deux méthodes ; on verra d'ailleurs plus loin qu'elles sont sensiblement égales aux valeurs données par le balistique.

CONDENSATEUR N° 10 au papier paraffiné (wattmètre) (fig. 37)

1^{re} série ($\omega = 41$)

Température	P_a	P_r	$\text{tg } \alpha$	$\frac{P_r}{\omega}$	$\frac{P_r}{\omega \cos \alpha}$
degrees	ergs:sec.	ergs:sec.		microfarads	microfarads
103°	6 050	1 460	4,15	3,56	15,2
88°	3 950	1 235	3,2	3,02	10,1
73°	2 200	1 050	2,1	2,56	6
64°	1 550	1 030	1,5	2,50	4,6
58°	900	855	1,05	2,08	3,03
54°	580	810	0,72	1,98	2,45
50°	230	510	0,45	1,23	1,37
36°	103	410	0,25	1,0	1,26

2^{me} série ($\omega = 157$)

103°	7 600	2 550	3,1	1,62	5,45
91°	6 400	2 650	2,5	1,68	4,65
82°	4 500	2 650	1,8	1,68	3,5
70°	2 800	2 650	1,12	1,68	2,56
64°	2 350	2 480	1,	1,57	2,24
60°	1 550	2 480	0,66	1,57	1,92
54°	1 000	2 250	0,44	1,43	1,52
53°	680	2 400	0,30	1,54	1,6
38°	320	1 700	0,19	1,08	1,08

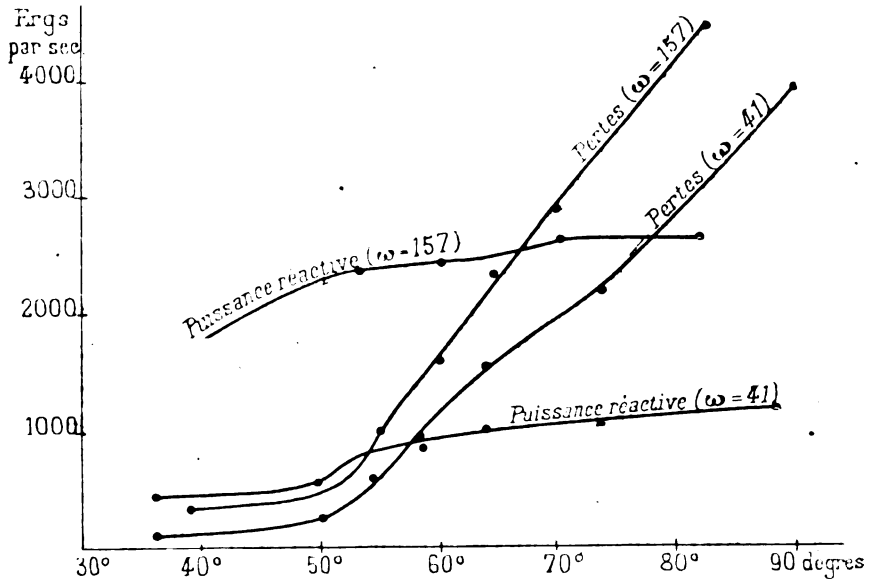


Fig. 37.

CONDENSATEUR N° 10 (au pont)					
1 ^{re} série ($\omega = 42$ $C' = 1 \mu f$)					
Température	$\frac{C' R'}{R}$	$\lg z$	P_d	P_r	$\frac{C' R'}{R} \cos \alpha$
degrés	microfarads		ergs.sec.	ergs.sec.	microfarads
98°	42,5	3,40	4 800	1 410	11,9
85°	24,2	2,65	3 370	1 270	8,5
76°	16,7	2,30	2 580	1 120	6,7
67°	11,2	1,82	2 000	1 090	5,4
60°	6,5	1,35	1 290	955	3,8
55°	2,82	0,70	500	715	2,3
51°	1,53	0,51	257	505	1,35
42°	1,32	0,29	139	480	1,25
2 ^{me} série ($\omega = 155$ $C' = 1 \mu f$)					
110°	31	3,53	10 300	2 900	11,5
95°	17,7	3,1	8 000	2 600	5,8
86°	10,1	2,4	6 590	2 700	3,8
82°	8,45	1,95	5 360	2 750	3,8
73°	5,85	1,58	4 100	2 600	3,1
60°	2,42	1,04	2 200	2 300	1,67
56°	1,67	0,60	1 150	1 940	1,45
55°	1,45	0,475	880	1 850	1,33
53°	1,28	0,295	530	1 800	1,23
37°	1,23	0,160	269	1 680	1,22

4° Enfin, une dernière question se pose : après la fusion, quelle est la principale cause de pertes, la viscosité ou les fuites ?

Il semble bien que, dans le cas qui nous occupe, l'action de la viscosité soit prépondérante et que le condensateur étudié soit assimilable à un condensateur parfait en série avec une résistance. Les résultats satisfaisants obtenus en faisant cette hypothèse dans la comparaison des différentes méthodes indiquent qu'elle est vraisemblable. Il existe d'ailleurs deux moyens expérimentaux permettant de trancher la question : la décharge directe au balistique et la mesure des fuites en courant continu.

La décharge au balistique devient relativement pénible à haute température. Il faut prendre des précautions spéciales pour éviter la formation de courants continus parasites qui ne gênaient aucunement dans les méthodes du pont et du wattmètre. En outre, comme l'essai dure très longtemps, on peut craindre que le maintien à température élevée ne finisse par modifier la constitution du diélectrique. Néanmoins, cette méthode montre avec une précision plus que suffisante, l'énorme déformation que fait subir au cycle de viscosité l'action de la température. Je donne ici les résultats obtenus avec le condensateur n° 10 déjà étudié. On remarquera que, sans coïncider avec ceux qu'avaient donnés

le pont et le wattmètre, ils ne s'en écartent que peu. En particulier, la valeur de la capacité est du même ordre de grandeur que celle qui a été calculée dans ces deux méthodes par la formule rectifiée.

Voici d'abord pour différentes températures les nombres qui déterminent les cycles : en face des tensions instantanées sont inscrites les quantités d'électricité correspondantes.

CONDENSATEUR N° 10 (Balistique)					
(ω = 150 Tension maximum 93 volts)					
	Volts	Microcoulombs		Volts	Microcoulombs
74°	0 cr.	— 200	65°	— 12 cr.	— 142
	58	— 80		45	— 46
	92 décr.	190		92	140
	73	260		86 décr.	190
	3	210		48	172
54°	— 33	150	51°	— 4	106
	5 cr.	— 55		2 cr.	— 40
	51	32		49	38
	90	126		82	104
	56 décr.	115		90 décr.	132
49°	— 5	53	44°	50	94
	48 cr.	— 78		— 2	34
	15	4		— 48 cr.	— 80
	64	80		9	— 10
	92 décr.	136		62	70
12°	65	100		91 décr.	125
	2	22		68	105
	10 cr.	10		29	55
	54	76		— 20	— 15
	86	119			
	79 décr.	114			
	40	61			
	1	4			

Après avoir tracé les cycles précédents (fig. 38), j'en ai déduit l'angle de perte par viscosité pure α , la capacité définie au balistique $C_{\max}$ en phase avec la tension et C_r , ses composantes C_a en quadrature et enfin les puissances réactive P_r et active P_a correspondant à 1 volt efficace :

Temp.	$C_{\max}$	C_a	$\sin \alpha$	C_r	P_a	P_r
74°	2,83	2,05	0,75	1,7	3 050	2 650
65°	2	1,15	0,58	1,6	1 720	2 420
54°	1,6	0,6	0,37	1,45	900	2 250
51°	1,4	0,4	0,28	1,35	600	2 050
49°	1,4	0,2	0,14	1,33	300	2 000
44°	1,35	0,2	0,15	1,31	300	2 000
12°	1,26	0,02	0,02	1,26	30	1 900

Enfin, j'ai essayé de procéder à la mesure de la résistance en courant continu ; pour cela, j'ai enregistré au balistique la différence entre la quantité d'électricité absorbée pendant un certain

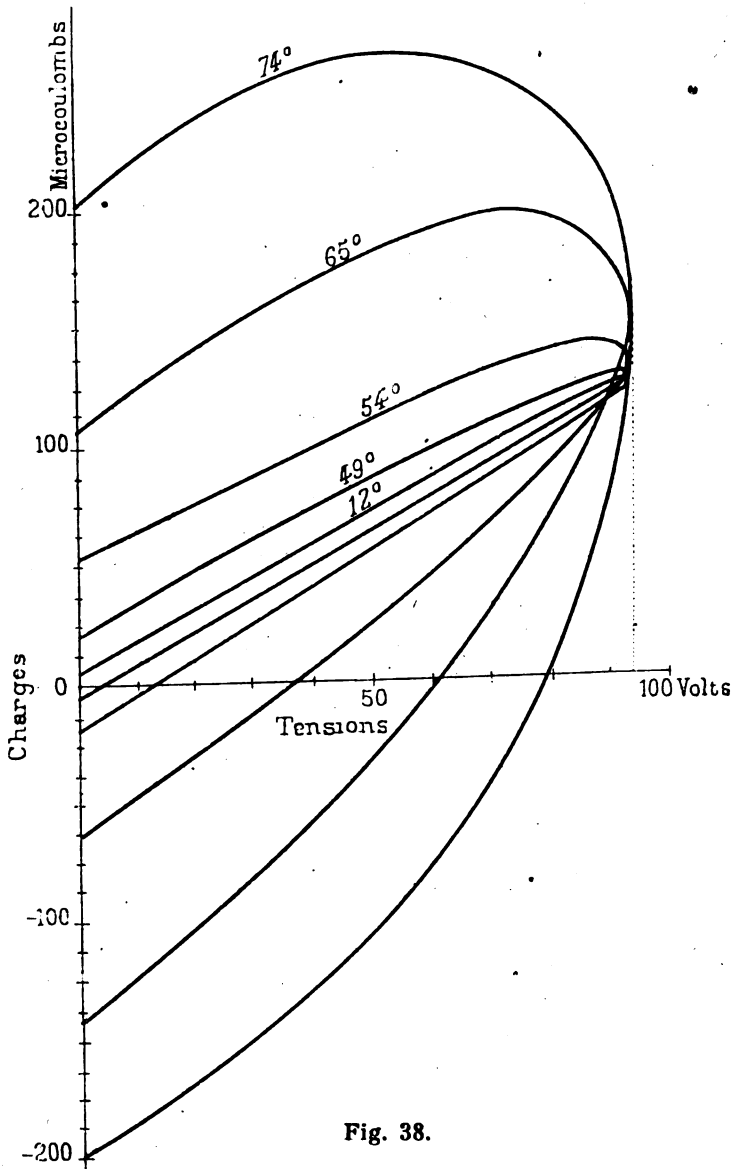


Fig. 38.

temps de charge et celle qui était restituée pendant une décharge consécutive très longue. J'ai obtenu :

35 000 ohms à 85° et 95 000 ohms à 58°.

Il en résulte qu'à 85° la puissance perdue par effet Joule sous 1 volt efficace serait de l'ordre de grandeur de $\frac{1}{35\,000}$ watt ou

300 ergs:seconde, tandis qu'au pont on obtient environ 10 fois plus ; il serait illusoire de pousser plus loin le calcul à cause du peu de précision que donne la mesure de la résistance ; on constate, en effet, qu'à cette température le diélectrique, sous l'action du courant continu, est soumis à une épuration beaucoup plus rapide qu'à froid. Ces résultats montrent cependant nettement que dans le condensateur étudié, les pertes par viscosité sont bien supérieures aux pertes par effet Joule. Cette conclusion n'est évidemment valable que pour les condensateurs à papier paraffiné.

C. *Cable au papier imprégné.* — Dans les expériences précédentes, les pertes croissaient constamment avec la température ; il n'en est pas toujours ainsi. Voici, par exemple, les résultats obtenus sur un câble pour basse tension au papier imprégné ; la matière d'imprégnation paraissait être un mélange d'huiles et de résines. La méthode employée a été celle du pont, modifiée d'après le schéma de la fig. 27. R et R' sont les bras du pont, γ la capacité de compensation, ω la pulsation en radians par seconde.

(Méthode du pont modifié $\omega = 5500$ $R = R' = 10\,000$ ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
0°	0,33	1,29	0,018
20°	0,16	1,28	0,009
35°	0,11	1,275	0,006
50°	0,15	1,275	0,008
70°	0,20	1,28	0,011

D. *Verre.* — J'ai étudié un échantillon de verre à fréquence téléphonique au moyen du pont modifié et à haute fréquence par la méthode de résonance.

$(\omega = 5500)$				
Température degrés	$R = R'$ ohms	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
— 15°	2 000	0,25	1,45	0,0027
20°	2 000	0,46	1,45	0,0051
50°	10 000	0,24	1,46	0,013
100°	10 000	0,44	1,48	0,024

$(\omega = 1\,570\,000)$			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
— 15°	0,7	1,45	0,0016
20°	1,3	1,45	0,0029
50°	1,75	1,45	0,0040
100°	2,8	1,46	0,0066

Les fuites étaient très faibles ; la résistance d'isolement mesurée en continu était supérieure à 1 000 mégohms pour 100°.

J'ai représenté en coordonnées logarithmiques (fig. 39), la variation de $\lg \alpha$ en fonction de la température absolue ; pour les fréquences étudiées, les courbes obtenues sont deux droites sensiblement parallèles.

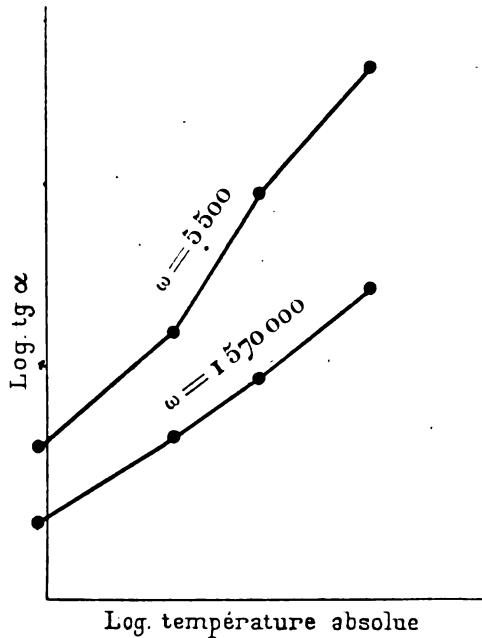


Fig. 39.

E. Huile lourde. — Les liquides ne se comportent pas de la même manière que les solides ; voici ce que j'ai obtenu avec de l'huile lourde de graissage :

(ω = 5 500) (Pont modifié R = R' = 10 (M) ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	tg α
20°	0,075	1,04	0,004
50°	0,25	1,05	0,014
60°	0,51	1,07	0,028
70°	0,82	1,10	0,046
ω = 1 570 (M) (Méthode de résonance)			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	tg α
20°	0,75	1,04	0,0012
50°	0,75	1,05	0,0012
60°	0,90	1,065	0,0015
70°	1,07.	1,08	0,0018

La résistance en courant continu à 50° était de 15 mégohms, ce qui correspond pour $\omega = 5500$ à

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{1,05 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^3} = 0,012 \text{ et pour } \omega = 1570\,000 \text{ à}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{1,05 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 1,57 \cdot 10^6} = 0,00006.$$

Pour 900 p:s et les fréquences inférieures, les pertes dues aux

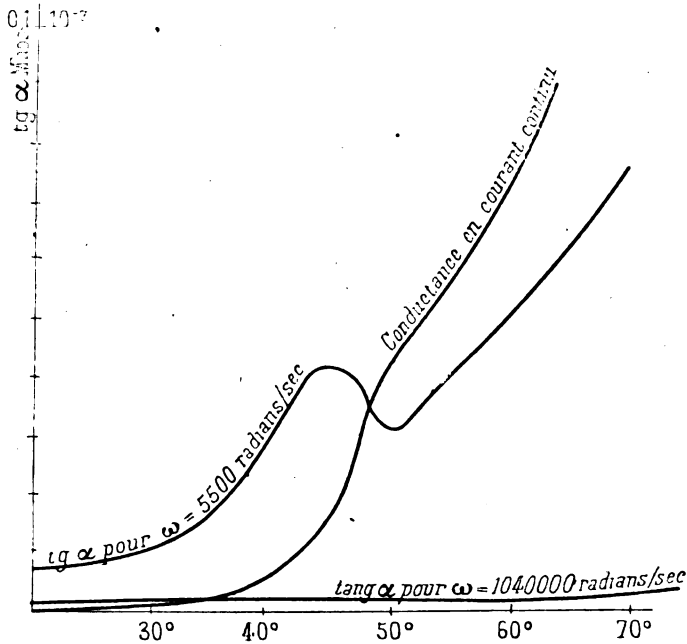


Fig. 40.

fuites sont donc tout à fait prépondérantes ; en haute fréquence, elles sont au contraire négligeables vis-à-vis des pertes par viscosité.

F. Cire. — J'ai étudié précédemment comment se comportait le papier paraffiné et montré que les fuites restaient relativement faibles, même après fusion de la paraffine. L'allure des phénomènes est bien différente pour une substance homogène. Des essais sur la paraffine m'ont donné des résultats trop faibles pour être précis ; avec la cire, j'ai obtenu les nombres suivants (fig. 40) :

($\omega = 5500$) (Pont modifié $R = R' = 10\,000$)

Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
22° solide	0,15	0,405	0,0085
35° —	0,31	0,40	0,017
42° —	0,63	0,39	0,0345
45° pâteux	0,75	0,38	0,041
48° —	0,65	0,36	0,036
50° liquide	0,57	0,34	0,0315
55° —	0,76	0,32	0,042
60° —	0,82	0,32	0,049
70° —	1,28	0,35	0,075

$\omega = 1\,040\,000$ (Méthode de résonance)

Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
22° solide	4,9	0,403	0,00205
35° —	5,8	0,40	0,0024
42° —	7	0,39	0,00285
45° pâteux	6,6	0,38	0,0026
48° —	6	0,355	0,0022
50° liquide	5,8	0,33	0,0020
55° —	6,2	0,31	0,0020
60° —	6,2	0,31	0,0020
70° —	6,6	0,33	0,00225

Courant continu

Température degrés	Capacité pour une décharge de $\frac{1}{30^e}$ de sec.	Résistance megohms
20° solide	0,48	8 700
30° —	0,65	280
35° —	0,74	220
43° —	1	110
46° pâteux	0,052 (1)	55
48° —	0,09	35
50° liquide	0,42	23
60° —	0,35	13
70° —	0,28	8

Ainsi, lorsque le diélectrique devient pâteux, la capacité résiduelle et l'angle de perte augmentent notablement, la conductibilité restant faible ; lorsque le corps devient liquide, les fuites se substituent presque entièrement à la viscosité pour les fréquences téléphoniques, tandis qu'à haute fréquence, la viscosité reste encore très sensible. A 60° par exemple, les fuites seules correspondraient en effet pour $\omega = 5\,500$ à :

(1) A partir de cette température, les nombres trouvés pour la capacité en courant continu ne signifient plus rien ; par suite de l'importance des fuites, une partie considérable de la charge disparaît pendant la commutation. Les essais en alternatif, par contre, montrent que la capacité diminue, par suite de la transformation des résidus en fuites.

$$\lg z = \frac{1}{0,32 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^3} = 0,043,$$

$$\text{et pour } \omega = 1\,040\,000 \text{ à } \lg z = \frac{1}{0,31 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^6 \cdot 1,04 \cdot 10^6} = 0,00024.$$

G. *Résine*. — L'essai précédent montre que, pour la cire, les pertes croissent avec la température à l'état solide puis à l'état liquide, le passage de l'état pâteux à l'état liquide correspondant au contraire à une diminution brusque de l'angle de perte. Dans l'échantillon de résine que j'ai étudié, probablement parce que l'état liquide parfait n'est jamais atteint, les phénomènes sont différents, les pertes diminuant constamment après la fusion.

$\omega = 1\,570\,000$ (Méth. de résonance)			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
20° solide	1,2	1,48	0,0028
40° —	3,5	1,48	0,008
60° pâteux	9	1,49	0,021
80° —	14,5	1,52	0,035
100° —	12	1,53	0,029
120° liquide	8	1,52	0,018

H. *Caoutchouc*. — Il me reste enfin à citer deux corps très intéressants en pratique mais théoriquement bien délicats à étudier : le caoutchouc et la gutta. Ces deux produits, le dernier surtout, possèdent lorsqu'on fait varier la température, une hystérésis mécanique énorme ; leur élasticité et leur dureté sont très variables ; en outre, pour le caoutchouc, les pertes diélectriques sont, comme on le verra plus loin, fortement influencées par la tension mécanique.

Les résultats d'expériences n'ont donc qu'une valeur relative et ne sont pas susceptibles d'une grande précision.

$\omega = 5500$ (Pont modifié. $R = R' = 2\,000$ ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
— 20°	1,05	1,465	0,0115
— 10°	0,64	1,45	0,007
0°	0,41	1,435	0,0045
10°	0,27	1,43	0,03
20°	0,21	1,42	0,0023
30°	0,28	1,42	0,0031
40°	0,32	1,43	0,0035
50°	0,43	1,445	0,0047

$\omega = 1570000$ (Méthode de résonance)

Température degrés	Capacité millimicrofarad	R ohms	$\lg \alpha$
0°	1,42	1,3	0,003
10°	1,41	0,9	0,002
20°	1,41	0,5	0,001
30°	1,415	0,5	0,001
40°	1,42	0,7	0,0015

Capacité en courant continu

Température degrés	Décharge en $\frac{1}{2500}$ s.	Décharge en $\frac{1}{300}$ s.
— 3°	1,88	2,45
20°	1,51	1,53
50°	1,79	1,82

Ces nombres indiquent nettement l'existence d'un minimum pour la capacité et l'angle de perte aux environs de 20°.

I. *Gutta*. — Je possédais un câble à gutta de bonne qualité, mais il était à deux conducteurs isolés à la gutta et séparés par du jute imprégné ; ce dernier aurait causé des pertes supplémentaires, de sorte que je n'ai pu l'employer. L'échantillon essayé a été de la gutta du commerce relativement impure.

$\omega = 5500$ (Pont modifié $R = R = 10000$ ohms)

Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
— 5°	1,27	2,85	0,07
6°	1,75	2,98	0,095
10°	1,85	3,02	0,101
20°	1,80	3,04	0,100
30°	1,20	3,04	0,065
41°	0,38	3,05	0,021
55°	0,25	3,06	0,014

$\omega = 1570000$ (Méthode de résonance)

Température	Capacité	R	$\lg \alpha$
5°	2,82	4,7	0,021
20°	2,89	7,3	0,033
30°	2,94	8,2	0,038
50°	2,97	8,5	0,040

Les essais en continu m'ont montré l'existence de résidus notables à basse température ; il m'a été impossible de relever des nombres précis.

Les résultats précédents indiquent que l'angle de perte passe par un minimum ; quand la fréquence augmente, la valeur de ce minimum diminue et la température correspondante augmente.

J. Conclusion. — On ne peut indiquer de loi rigoureuse pour représenter les pertes en fonction de la température ; les exemples précédents peuvent pourtant donner lieu à quelques remarques générales.

Pour des corps solides sur lesquels la température n'a pas d'action mécanique sensible (verre), les pertes sont proportionnelles à une certaine puissance de la température absolue. Les pertes dues aux fuites sont négligeables vis-à-vis des pertes par viscosité.

L'apparition de l'état pâteux (cire, résine), provoque une augmentation notable des pertes par viscosité, mais n'a pas une grande influence sur les fuites.

Le passage de l'état pâteux à l'état liquide transforme la viscosité en conductibilité, sauf pour le papier imprégné ; dans ce dernier cas, en effet, les charges électriques peuvent se mouvoir dans la matière d'imprégnation fondue mais, sont presque complètement arrêtées par les cloisons de papier et jouent le rôle de résidus.

Dans un liquide bien fluide, les pertes à basse fréquence ne sont dues qu'aux fuites ; à haute fréquence au contraire, les pertes par viscosité sont nettement prépondérantes.

III. INFLUENCE DE LA TENSION. — A. L'influence de la tension sur l'angle de perte est relativement faible. La plupart des auteurs indiquent que les pertes sont proportionnelles à une certaine puissance de la tension, voisine du carré. Pour M. Beaulard de Lenaizan (balistique), et M. Houllevigue (calorimètre), cet exposant est voisin de 2. Pour Skinner (wattmètre électrostatique), il varie de 2 à 2,5 suivant les échantillons. Enfin, Frigon (wattmètre électrodynamique) trouve qu'il varie depuis 2,7 à 15° jusqu'à 1,9 à 120°.

Toutes les méthodes ne sont pas également pratiques pour étudier l'influence de la tension.

Le tracé des cycles ne donne pas une précision suffisante. Chaque point n'est déterminé qu'approximativement ; il en résulte que l'erreur commise pour l'évaluation de l'angle de perte est souvent supérieure à la variation due à l'influence de la tension. En outre, j'ai constaté que si les décharges au balistique ne sont pas poussées assez loin, les résidus qui subsistent après les essais à haute tension rendent impossible tout essai ultérieur à basse tension.

La méthode calorimétrique, longue et peu sensible, est également à rejeter. Les mesures au wattmètre et l'utilisation de la résonance sont évidemment possibles, mais le procédé le plus indiqué est certainement l'emploi d'une méthode de zéro, le pont par exemple.

B. J'ai étudié au pont de Wien un condensateur à papier paraffiné possédant une grande capacité sous un petit volume (25 cm³). Je l'ai comparé à un étalon au mica ; les faibles pertes que pouvait présenter celui-ci n'ont aucune importance car il ne s'agit ici que de mesures relatives.

1° Sous 5 volts efficaces, j'ai obtenu, à la fréquence 900 :

$$C = 0,985 \mu F \qquad \qquad \qquad \operatorname{tg} \alpha = 0,041$$

2° Sous 105 volts efficaces, l'équilibre n'était que momentané, la capacité et l'angle de perte augmentant sans cesse ; j'ai pu noter les valeurs suivantes :

Au bout de 1 minute	$C = 0,987 \mu F$	$\operatorname{tg} \alpha = 0,048$
— — 2 —	$C = 0,990$	$\operatorname{tg} \alpha = 0,057$
— — 3 —	$C = 0,995$	$\operatorname{tg} \alpha = 0,071$

3° Au bout de 3 minutes, j'ai ramené la tension à 5 volts. L'équilibre s'est maintenu pour :

$$C = 0,995 \mu F \qquad \qquad \qquad \operatorname{tg} \alpha = 0,069$$

J'ai donc été amené à conclure que la variation de l'angle de perte était due à l'échauffement du diélectrique ; il se dégageait dans le condensateur une quantité de chaleur voisine de 0,5 calorie par seconde et qui ne pouvait se dissiper que très lentement. En continuant l'essai sous 105 volts pendant 10 minutes, j'ai même obtenu la fusion de la paraffine.

C. J'ai voulu refaire une expérience analogue sur des condensateurs de faible capacité ; j'ai été conduit à opérer sous des tensions plus élevées et pour cela, il m'a fallu, tout en conservant le montage de Wien, apporter au pont certaines modifications de détail.

Pour éviter que le condensateur de comparaison ne soit le siège d'effluves, je l'ai rempli de pétrole bien sec distillé sur du sodium ; j'ai recommencé son étalonnage et constaté que ses pertes étaient à peu près insensibles.

Je n'ai pu me placer dans les conditions de sensibilité maximum, sans quoi mes résistances auraient été soumises à un régime excessif ; en leur donnant une valeur de 2 000 ohms, dans le cas de

condensateurs de $1 \text{ m } \mu\text{F}$, je ne leur faisais supporter que le $\frac{1}{10^6}$ de la tension totale, de sorte qu'elles pouvaient rester constamment en circuit sans chauffer d'une manière appréciable.

Enfin, pour éviter que le contact du téléphone ne devienne dangereux en cas de claquage d'un condensateur, je l'ai réuni au pont par l'intermédiaire d'un transformateur bien isolé à circuit magnétique fermé.

1° J'ai étudié un ballon de verre très mince, argenté à l'intérieur et à l'extérieur et dont le col était légèrement paraffiné. A la fréquence 900 p.s, sous 70 volts, j'ai obtenu :

$$C = 1,12 \text{ m } \mu\text{F} \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,0285$$

2° Sous 850 volts, l'équilibre était permanent

$$C = 1,13 \text{ m } \mu\text{F} \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,0325$$

3° En recommençant à 70 volts, j'ai retrouvé encore :

$$C = 1,12 \text{ m } \mu\text{F} \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,0285$$

Ces résultats semblent indiquer que par suite de la faible capacité calorifique du condensateur et de sa grande surface de rayonnement, le régime s'établit rapidement et qu'au bout de très peu de temps, l'échauffement reste constant.

4° Pour confirmer ces résultats, j'ai augmenté la capacité calorifique du condensateur en le remplissant de pétrole et en le plongeant dans un verre plein de pétrole. J'ai alors obtenu :

$$\text{Sous une tension efficace de 70 volts } C = 1,13 \text{ m } \mu\text{F} \text{ tg } \alpha = 0,0280$$

$$\text{— — — — — 850 — } C = 1,13 \text{ — tg } \alpha = 0,0285$$

Ainsi, lorsqu'on empêche l'élévation de température, l'angle de perte reste indépendant de la tension.

D. J'ai essayé de mesurer l'échauffement du condensateur pour préciser les résultats précédents.

J'ai utilisé pour cela un ballon analogue au précédent, mais auquel j'avais adapté un tube capillaire horizontal contenant un index de pétrole ; ce condensateur était placé dans une étuve non allumée au début de l'expérience.

1° Sous une tension efficace de 101 volts, l'index est resté immobile et j'ai obtenu :

$$C = 1,28 \text{ m } \mu\text{F} \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,026$$

2° Sous une tension efficace de 950 volts, l'index s'est déplacé lentement puis s'est fixé au bout d'une minute environ après avoir

parcouru 2,8 cm (ce qui, d'après le volume du ballon et le diamètre du tube correspondait à 1°4). J'ai noté alors :

$$C = 1,30 \text{ m}\mu\text{F} \qquad \text{tg } \alpha = 0,031$$

3° J'ai ensuite allumé l'étuve quelques instants puis l'ai éteinte ; l'index s'est déplacé lentement et s'est fixé à 3,6 cm de sa position initiale. J'ai aussitôt recommencé un essai sous 104 volts et obtenu :

$$C = 1,31 \text{ m}\mu\text{F} \qquad \text{tg } \alpha = 0,032$$

Les rapports $\frac{0,031 - 0,026}{2,8}$ et $\frac{0,032 - 0,026}{3,6}$ étant égaux à l'approximation des mesures, j'ai considéré comme établi quantitativement que la variation de l'angle de perte était dans le cas étudié uniquement dû à un échauffement.

E. Dans les exemples précédents à tension élevée, j'avais pris soin d'argenter les tubes pour que le contact entre le diélectrique et les armatures soit excellent et de paraffiner le col du tube pour éviter les effluves.

Lorsque les armatures ne sont séparées que par un léger intervalle d'air, les pertes par effluves peuvent devenir importantes. On peut les mettre en évidence sur un condensateur plan dont les lames isolantes ne débordent pas sur les armatures, mais il est particulièrement facile de constater leur existence sur des condensateurs à air.

J'ai donc comparé un condensateur variable à air avec un autre du même type rempli de pétrole bien sec. Aux basses tensions, ce dernier était le plus mauvais, mais pour lui $\text{tg } \alpha$ ne dépassait pas 0,002. Aux environs de 300 volts efficaces, les pertes ont apparu dans le condensateur à air et sont devenues rapidement prépondérantes ; $\text{tg } \alpha$ a atteint 0,02 pour 500 volts et 0,07 pour 600 volts. Enfin, un peu avant 700 volts, des étincelles ont jailli entre les armatures.

Je dois ajouter que les dernières mesures n'étaient pas susceptibles d'une grande précision ; les résultats variaient constamment sans cause apparente.

F. *Conclusion.* — Lorsque la température reste constante, la perte dans le diélectrique est proportionnelle au carré de la tension. Le plus souvent, par suite de l'échauffement du diélectrique ou de l'existence d'effluves, les pertes croissent plus vite que le carré de la tension.

IV. — INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR. — A. *Généralités.* — L'angle de perte devrait être indépendant de l'épaisseur du diélectrique ; un certain nombre d'effets secondaires empêche le plus souvent de vérifier cette loi avec précision.

Les pertes dans un condensateur sont de deux sortes. Les unes, dues à la viscosité et à la conductibilité, se produisent dans la masse même et peuvent avoir pour effet d'échauffer sensiblement l'intérieur du diélectrique si la dissipation de chaleur par les armatures n'est pas suffisante. Les autres ont lieu à la surface, par suite du mauvais contact avec les armatures et sont proportionnelles à leur étendue.

Si l'on double l'épaisseur du diélectrique, en laissant par exemple le champ constant, ces différentes pertes ne sont pas modifiées de la même manière. En effet, puisque la surface de contact n'a pas changé, les pertes à la surface sont sensiblement les mêmes ; les pertes totales, par contre, ont doublé ; l'influence relative des pertes à la surface a donc diminué de moitié. D'autre part, la quantité de chaleur dégagée par centimètre cube n'a pas varié, mais, puisque le volume du diélectrique a doublé tandis que la surface d'évacuation est restée constante, l'élévation de température est supérieure ; l'influence de l'échauffement est donc exagérée.

Si c'est la tension entre les armatures et non le champ que l'on maintient constante, les conclusions sont inverses. Dans tous les cas, suivant la qualité du contact et la valeur du coefficient de température, on peut trouver expérimentalement que l'angle de perte est une fonction croissante ou décroissante de l'épaisseur.

J'ai opéré de plusieurs manières pour modifier l'épaisseur du diélectrique.

B. *Diélectriques solides. Plaques superposées.* — Il est difficile d'obtenir deux plaques identiques ; même si elles sont découpées dans le même échantillon, leur angle de perte n'est pas rigoureusement égal ; en outre, le contact des deux surfaces du diélectrique accolées peut être mauvais.

Si c_1 et c_2 sont les capacités de condensateurs formés avec chacune des plaques, α_1 et α_2 les angles de perte correspondants, la capacité C d'un condensateur formé avec les deux plaques superposées et son angle de perte A doivent satisfaire aux relations :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \frac{\operatorname{tg} A}{C} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{C_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{C_2}.$$

J'ai essayé d'abord des lames de mica armées d'étain ; avec des lames très minces, la loi est très mal vérifiée, probablement parce qu'il restait entre elles une épaisseur d'air relativement importante. Avec des micas plus épais, j'ai obtenu des résultats meilleurs mais peu précis cependant à cause de la faiblesse de l'angle de perte.

J'ai étudié ensuite des lames de verre ordinaire (plaques photographiques) armées d'étain. Les mesures ont été faites au pont modifié, à la fréquence 900 p.s en compensant les pertes du condensateur étudié par un condensateur variable γ ; les bras du pont avaient une résistance de 10 000 ohms ; la tension d'alimentation était de 50 volts efficaces, ce qui correspond à 25 volts environ aux bornes du condensateur étudié.

1 ^{re} plaque	$\gamma = 0,57 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 0,48 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,0322$
2 ^{de} plaque	$\gamma = 0,54$	$C_2 = 0,42$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,0305$
les deux superposées	$\gamma = 0,52$	$C = 0,205$	$\operatorname{tg} A = 0,0294$

Les formules théoriques donnent dans ce cas :

$$C = 0,225 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} A = 0,0312.$$

Ces différences proviennent d'un intervalle d'air important entre les lames de verre.

J'ai recommencé l'expérience avec deux lames bien planes, vérifiées optiquement, et bien nettoyées ; les résultats ont été bien meilleurs :

1 ^{re} plaque	$\gamma = 0,35 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 0,032 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,198$
2 ^{de} plaque	$\gamma = 0,39$	$C_2 = 0,034$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,220$
les deux superposées	$\gamma = 0,36$	$C = 0,017$	$\operatorname{tg} A = 0,204$

Les nombres théoriques sont $C = 0,165 \text{ m } \mu \text{ F}$ et $\operatorname{tg} A = 0,0209$.

Avec du papier paraffiné de 0,5 mm d'épaisseur armé d'étain, j'ai vérifié convenablement la loi théorique, mais avec du papier très mince, de 0,02 mm environ, j'ai nettement mis en évidence l'action de la température.

1^{er} essai : tension efficace d'alimentation 5 volts.

1 ^{re} feuille	$\gamma = 0,68 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 3,97 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,0384$
2 ^{de} feuille	$\gamma = 0,65$	$C_2 = 4,07$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,0420$
les deux superposées	$\gamma = 0,675$	$C = 1,98$	$\operatorname{tg} A = 0,0380$

Les résultats devraient être théoriquement :

$$C = 2,02 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} A = 0,0375$$

• 2^e essai : tension efficace d'alimentation 75 volts.

1 ^e feuille	$\gamma = 0,77 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 4,07 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\text{tg } \alpha_1 = 0,0435$
2 ^e feuille	$\gamma = 0,745$	$C_2 = 4,15$	$\text{tg } \alpha_2 = 0,0420$
les deux superposées	$\gamma = 0,70$	$C = 2,01$	$\text{tg } A = 0,0335$

Les formules théoriques donnent : $C = 2,10 \text{ m } \mu \text{ F}$ et $\text{tg } A = 0,0427$

Alors que dans le premier essai l'équilibre se maintenait indéfiniment, il était difficile à obtenir dans le deuxième ; les nombres précédents ont été notés une demi-minute après la mise sous tension.

C. *Diélectriques liquides ou pâteux.* — Un diélectrique liquide ou pâteux est très suffisamment homogène ; il est facile de faire varier son épaisseur ; enfin, son contact avec les armatures est excellent. Pour toutes ces raisons, la loi théorique se vérifie convenablement.

J'ai opéré, sous 5 volts seulement, avec de l'huile lourde, puis avec de la vaseline ; ces derniers résultats sont les plus précis parce que l'angle de perte est le plus important.

Pour $C = 0,31 \text{ m } \mu \text{ F}$, $\text{tg } \alpha = 0,0181$

Pour $C = 0,65 \text{ m } \mu \text{ F}$, $\text{tg } \alpha = 0,0185$

D. *Solides d'épaisseur variable.* — J'ai fait varier l'épaisseur de plaques par fusion, de ballons de verre par soufflage au chalumeau et de lames de caoutchouc par traction ; les nombres obtenus sont tout à fait en contradiction avec la loi à vérifier. On ne doit pas s'étonner des résultats relatifs à la cire et au verre parce que les effets de l'échauffement ne disparaissent que lentement, mais on doit noter que la tension mécanique a sur la viscosité du caoutchouc une influence considérable.

Le condensateur utilisé pour ces dernières expériences était constitué par un ballon de caoutchouc très élastique contenant du mercure et plongeant dans un cristalliseur plein de mercure. En faisant varier la quantité contenue dans le ballon, je pouvais agir sur son volume et par suite sur l'épaisseur de la paroi.

Pour une tension mécanique nulle (mercure au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur), j'ai obtenu $\text{tg } \alpha = 0,0315$.

Pour une épaisseur 11 fois plus faible (calculée d'après le volume de l'armature intérieure), j'ai obtenu $\text{tg } \alpha = 0,0065$.

Ainsi, quand l'épaisseur est devenue 11 fois plus faible, l'angle de perte est tombé au cinquième de sa valeur. Le contact mercure-caoutchouc est d'ailleurs excellent et ne peut être le siège de pertes parasites. Enfin, j'ai vérifié, en faisant varier la ten-

sion d'alimentation, que cette diminution de l'angle de perte n'était pas due à un échauffement, ce qui est naturel puisque la lame était extrêmement mince et plongeait dans du mercure.

Dans ces essais, le diélectrique était soumis à un champ extrêmement intense. L'épaisseur du caoutchouc non tendu était de 0,02 mm. Pour une épaisseur 11 fois plus faible et une tension de 100 volts, le champ dépassait plusieurs centaines de volts par centimètre.

E. *Conclusion.* — Lorsque le diélectrique reste physiquement identique à lui-même et qu'il est en contact parfait avec les armatures, l'angle de perte est indépendant de l'épaisseur.

V. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ. — Sauf de rares exceptions, les isolants sont hygrométriques. L'eau absorbée peut être dosée chimiquement dans des corps qui en dissolvent une quantité notable comme la cire ou l'huile ; elle est mise en évidence dans les autres cas par les variations que subissent les propriétés diélectriques sous l'influence d'un séchage prolongé.

J'ai étudié l'influence de l'humidité, au pont modifié pour les fréquences musicales, par la méthode de résonance à haute fréquence et par la décharge au balistique en continu. Voici quelques résultats :

A. *Papier buvard.* — Un des échantillons, exposé pendant plusieurs jours dans le laboratoire, possédait une certaine humidité ; l'autre avait été séché quelques minutes à l'étuve.

1° *Papier buvard humide.*

A la fréquence 900 p:s $\left\{ \begin{array}{l} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} \\ \gamma = 1,12 \text{ m } \mu \text{ F} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Capacité : } 1,48 \text{ m } \mu \text{ F} \\ \text{tg } \alpha = 0,063. \end{array}$

Résistance en courant continu : 16 mégohms.

2° *Papier buvard sec.*

A la fréquence 900 p:s $\left\{ \begin{array}{l} R = R' = 2\,000 \text{ ohms} \\ \gamma = 0,24 \text{ m } \mu \text{ F} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Capacité : } 1,22 \text{ m } \mu \text{ F} \\ \text{tg } \alpha = 0,0027 \end{array}$

Résistance en courant continu : 280 mégohms.

Cet essai ne permet pas d'évaluer avec précision l'influence de l'humidité sur la constante diélectrique parce que la disposition de la feuille de papier entre les armatures n'était pas identique dans les deux cas, mais, il montre nettement que :

En courant continu comme en courant alternatif, les pertes sont environ 20 fois plus grandes pour le papier humide que pour le papier sec. Les pertes en courant alternatif ne proviennent pas simplement des fuites mesurées en continu ; la présence de

celles-ci ne fournirait en effet pour l'angle de perte, à 900 p:s que les valeurs :

$$\text{Papier humide } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{1,48 \cdot 10^{-9} \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 2 \pi \cdot 900} = 0,0075.$$

$$\text{Papier sec } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{1,22 \cdot 10^{-9} \cdot 280 \cdot 10^6 \cdot 2 \pi \cdot 900} = 0,00052.$$

B. *Papier paraffiné.* — Le premier échantillon a été constitué par du buvard possédant l'humidité du laboratoire, imprégné dans de la paraffine fondue à 55°. Pour la fabrication du second, le papier avait été séché au préalable et la paraffine a été portée à 130° ; un dégagement abondant de bulles s'est produit pendant le paraffinage.

1° *Papier paraffiné humide.*

$$\begin{aligned} \text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{l} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} \quad \text{Capacité : } 0,52 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,66 \text{ m } \mu\text{F} \quad \operatorname{tg} \alpha = 0,038 \end{array} \right. \\ \text{Fréquence 250 000 p:s, } R = 9,2. \text{ Capacité } 0,45 \text{ m } \mu\text{F } \operatorname{tg} \alpha = 0,0064 \end{aligned}$$

$$\text{Courant continu } \left\{ \begin{array}{l} \text{Résistance de fuites : } 1\,040 \text{ mégohms.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } \frac{1}{40^e} \text{ de sec., } 0,8 \text{ m } \mu\text{F.} \\ \text{Capacité pour une décharge de 10 sec., } 3,17 \text{ m } \mu\text{F.} \end{array} \right.$$

2° *Papier paraffiné sec :*

$$\begin{aligned} \text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{l} R = R' = 2\,000 \text{ ohms} \quad \text{Capacité : } 0,51 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,31 \text{ m } \mu\text{F} \quad \operatorname{tg} \alpha = 0,0035 \end{array} \right. \\ \text{Fréquence 250 000 p:s, } R = 3,45. \text{ Capacité : } 0,48 \text{ m } \mu\text{F } \operatorname{tg} \alpha = 0,0026 \end{aligned}$$

$$\text{Courant continu } \left\{ \begin{array}{l} \text{Résistance de fuites : } 17\,000 \text{ mégohms.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } \frac{1}{40^e} \text{ de sec. } 0,58 \text{ m } \mu\text{F.} \\ \text{Capacité pour une décharge de 10 sec. } 1,36 \text{ m } \mu\text{F.} \end{array} \right.$$

Le papier paraffiné sec est donc bien meilleur, surtout aux basses fréquences. La comparaison de ces résultats aux précédents montre immédiatement que le paraffinage du buvard a considérablement réduit les fuites ; par contre, les pertes en alternatif n'ont pas été beaucoup modifiées.

C. *Porcelaine poreuse.* — J'ai étudié un vase de pile neuf, paraissant relativement sec extérieurement et ayant séjourné longtemps dans le laboratoire.

$$\text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{l} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} \quad \text{Capacité : } 0,33 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,45 \text{ m } \mu\text{F environ} \quad \operatorname{tg} \alpha = 2,6 \text{ env.} \end{array} \right.$$

Fréquence 250 000 p.s : $R = 120$ ohms. Capacité : $0,11 \text{ m } \mu \text{ F}$
 $\text{tg } \alpha = 0,055$.

Courant continu	{	Capacité pour une déch. de $\frac{1}{150^{\circ}}$ de sec.,	$1,35 \text{ m } \mu \text{ F}$
		— — — 2 sec.,	$5 \text{ m } \mu \text{ F}$.
		— — — 30 sec.,	$32 \text{ m } \mu \text{ F}$.

Les dimensions de ce vase poreux étaient telles que cette capacité de $32 \text{ m } \mu \text{ F}$ correspondait à un pouvoir inducteur de 3 800, chiffre extraordinairement grand.

Après séchage pendant un quart d'heure à l'étuve, j'ai obtenu à 900 p.s le résultat suivant :

$$R = R' = 10\,000 \text{ ohms} \qquad \text{Capacité : } 0,06 \text{ m } \mu \text{ F}$$

$$\gamma = 1,07 \text{ m } \mu \text{ F} \qquad \text{tg } \alpha = 0,06$$

Cette fois, les pertes sont considérablement réduites et le pouvoir inducteur tombe à 7, chiffre tout à fait acceptable.

D. *Conclusion.* — Pour les matières poreuses, l'humidité semble être la seule cause de pertes, tant en courant continu qu'en courant alternatif.

L'influence de l'humidité se fait surtout sentir à basse fréquence.

Les pertes en courant alternatif ne peuvent pas se déduire de la résistance de fuites mesurée en courant continu.

VI. INFLUENCE DE LA NATURE DES ARMATURES. — Le contact entre le diélectrique et les armatures a une influence marquée sur les qualités d'un condensateur, mais il ne semble pas que la question ait préoccupé beaucoup de chercheurs.

En courant continu, M. Bouty ⁽¹⁾ signale que dans les condensateurs au mica armés d'étain, le pouvoir inducteur apparent est bien inférieur à celui du mica argenté ; Allen ⁽²⁾ indique que l'éri-noïd poli présente moins de résidus que lorsqu'il est dépoli. En courant alternatif, Bureau ⁽³⁾ montre que le contact papier d'étain-toile huilée n'est pas nettement défini.

Pourtant, l'étude de ce contact mériterait d'être étudiée d'une manière spéciale, car il peut entraîner pour les propriétés du

⁽¹⁾ BOUTY. *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e Série, tome XXIV, page 391, 1891.

⁽²⁾ ALLEN. *Scientifics Proceedings Royal Dublin Society*, 1913, vol. XV N^o 29. p. 331.

⁽³⁾ BUREAU. *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, 1913, 3^e Série, tome III, p. 669.

diélectrique des erreurs notables comme le prouvent les exemples suivants :

A. *Diélectrique : verre, armatures : Mercure.* — Le condensateur est constitué par un tube à essai rempli de mercure et plongé dans un autre tube plein de mercure. L'armature externe a une hauteur fixe de 10 cm; on fait varier la hauteur de l'armature interne.

Les mesures sont faites par la méthode du pont modifié pour les fréquences téléphoniques (R et R' sont les bras du pont, γ la capacité de compensation) et par la méthode de résonance en haute fréquence (R est la résistance en série avec le condensateur à air).

1 ^o Fréquence 900 p/s (R = R' = 10 000 ohms)			
Différence entre le niveau de l'armature interne et celui de l'armature externe	γ	Capacité	tg α
millimètres	millimicrofarad	millimicrofarad	
10	0,87	0,955	0,048
2	0,67	0,958	0,037
0	0,60	0,963	0,033
— 2	0,64	0,967	0,035
— 10	0,84	0,970	0,046
2 ^o Fréquence 250 000 p/s			
	R		
	ohms		
10	4,15	0,86	0,0047
2	3,70	0,92	0,0045
0	3,60	0,94	0,0045
— 2	3,65	0,95	0,0046
— 10	3,80	0,955	0,0048

Ainsi, quand le niveau du mercure n'est pas le même à l'intérieur et à l'extérieur, les pertes sont augmentées ; il est naturel de penser que les charges électriques des armatures se répandent peu à peu à la surface conductrice du verre, jouant ainsi le rôle de résidus. On s'explique alors pourquoi les pertes passent par un minimum lorsque les deux niveaux sont égaux, et pourquoi l'effet perturbateur est d'autant plus sensible que la fréquence est plus basse. J'ai vérifié d'ailleurs qu'un léger paraffinage du col du tube affaiblissait considérablement le phénomène.

B. *Diélectrique : verre, armatures : Etain.* — J'ai comparé le mercure et le papier d'étain ; le diélectrique était un tube à essai moins mauvais que le précédent. L'armature interne était

toujours du mercure ; la surface extérieure du verre était tantôt recouverte de papier d'étain, tantôt plongée dans un autre tube plus grand rempli de mercure ; les deux armatures avaient toujours la même hauteur.

Les expériences étaient alternées et je prenais mes précautions pour que la température du verre fût toujours constante ; en particulier, après avoir enroulé le papier d'étain, je remplissais chaque fois le condensateur de mercure froid pour enlever au diélectrique la chaleur que ma main avait pu lui communiquer ; un interrupteur me permettait de ne mettre le condensateur sous tension que pendant un temps très court.

Les méthodes employées étaient les mêmes que précédemment. Voici les résultats obtenus dans plusieurs essais successifs :

1° Fréquence 900 p/s ($R = R' = 10\,000$ ohms)			
	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	tg α
Etain	0,68	0,345	0,0385
Mercure	0,36	0,482	0,0198
Etain	0,44	0,380	0,0240
Mercure	0,36	0,486	0,0198
Etain	0,59	0,350	0,0325
Mercure	0,37	0,478	0,0202
Etain	0,49	0,395	0,0270
Mercure	0,36	0,483	0,0198

2° Fréquence 251 000 p/s			
	R ohms	Capacité millimicrofarad	tg α
Etain	13,5	0,310	0,0055
Mercure	14,7	0,455	0,0088
Etain	12,3	0,325	0,0053
Mercure	14,5	0,459	0,0088
Etain	13	0,325	0,0056
Mercure	15	0,450	0,0089
Etain	12,4	0,320	0,0052
Mercure	14,5	0,455	0,0087

En courant continu, les condensateurs à armatures d'étain présentent des résidus considérables, mais aucune mesure précise n'a été possible.

On voit sur ces résultats que les capacités obtenues avec des armatures en mercure diffèrent légèrement pour une même fréquence ; la constance de l'angle de perte correspondant montre que c'est simplement parce que les dimensions du condensateur n'étaient pas chaque fois rigoureusement les mêmes.

Au contraire, pour les armatures en papier d'étain, les capa-

cités et les angles de perte varient sans aucune loi ; le contact est tout à fait mal défini ; les essais suivants conduisent d'ailleurs aux mêmes conclusions.

C. *Diélectrique : Toile huilée, armatures : Etain.* — La toile huilée a d'abord été placée entre deux plaques d'aluminium bien planes (mais pas absolument parfaites) chargées par des poids, et étudiée à la fréquence 900 p:s ; la surface utile était de 94 cm². Les résistances R et R' étaient de 10 000 ohms.

Poids grammes	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg z$
50	0,31	0,435	0,0170
200	0,32	0,480	0,0176
500	0,41	0,590	0,0223

Le même échantillon de toile a été équipé avec deux armatures de papier d'étain légèrement pressées.

$$\gamma = 0,57 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,68 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,0315$$

Après avoir soigneusement écrasé le papier d'étain avec le doigt pour lui faire épouser toutes les rugosités de la surface :

$$\gamma = 0,88 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,82 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,0485$$

L'échantillon a été garni d'un petit rebord en paraffine, rempli d'une légère couche de mercure et mis à nager sur du mercure.

$$\gamma = 0,90 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,94 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,0495$$

Il a été ensuite protégé par un paraffinage sur les bords, plombagé sur toute la surface utile, puis équipé avec des armatures d'étain.

$$\gamma = 0,89 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,92 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,0490$$

Ces résultats indiquent clairement que, dans le cas actuel, plus le contact est intime, plus l'angle de perte est grand.

D. *Diélectrique : Papier buvard. Armatures : Papier d'étain.* — Avec l'humidité du laboratoire, plié en forme de boîte, rempli d'un peu de mercure et nageant sur du mercure (à la fréquence 900 p:s au pont, pour $R = R' = 10\,000$ ohms), il a donné :

$$\gamma = 1,85 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,410 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,265$$

La même surface utile (55 cm²) armée d'étain et chargée de 50 g :

$$\gamma = 1,02 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,051 \text{ m}\mu\text{F} \quad \lg z = 0,056$$

Pour une charge de 1 kg ;

$$\gamma = 2,90 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{Capacité : } 0,315 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{tg } \alpha = 0,160$$

E. *Diélectrique : Verre. Armatures : Eau.* — En courant continu et à basse fréquence, je n'ai obtenu que des résultats incohérents, l'humidité se condensant sur les parties du diélectrique voisines des armatures. Pour les fréquences téléphoniques, les pertes sont plus grandes avec l'eau qu'avec le mercure ; en haute fréquence, elles sont équivalentes.

1° Fréquence 900 p.s (R = R' = 10 000 ohms)			
	γ millimicrofarads	Capacité millimicrofarads	tg α
Mercure	0,51	0,936	0,0280
Eau ordinaire	0,79	0,955	0,0435
Eau acidulée	0,90	0,963	0,0450

2° Fréquence 250 000 p.s			
	R ohms	C millimicrofarad	tg α
Mercure	7,5	0,903	0,0089
Eau ordinaire	7,6	0,925	0,0097
Eau acidulée	7,6	0,935	0,0098

F. *Diélectrique : Verre. Armatures : Limaille de fer.* — 1° A 900 p.s :

$R = R' = 10\,000$ ohms $\gamma = 2,7 \text{ m } \mu \text{ F}$. Capacité : 0,35 m $\mu \text{ F}$
tg $\alpha = 0,15$.

2° A 250 000 p.s :

Capacité 0,10 m $\mu \text{ F}$ environ. Angle de perte très grand ; impossible d'obtenir la résonance.

3° Le même diélectrique, avec armatures de mercure ; à 900 périodes :

$R = R' = 10\,000$ $\gamma = 0,45 \text{ m } \mu \text{ F}$. Capacité : 0,48 m $\mu \text{ F}$ tg $\alpha = 0,0247$

G. *Diélectrique : Verre. Armatures : Argent.* — Le verre était argenté par voie chimique ; j'ai obtenu les mêmes résultats qu'avec le mercure.

H. *Conclusion.* — Tous les résultats précédents s'expliquent simplement si l'on remarque que :

1° La surface des diélectriques est relativement conductrice (humidité, traces de doigts, produits d'oxydation) ;

2° Un mauvais contact entre l'isolant et l'armature nécessite un intervalle d'air plus ou moins important ;

3° Une armature pulvérulente a une résistance ohmique importante.

L'effet de contact peut donc être représenté schématiquement par la figure 41 où la signification des lettres est la suivante :

- A Partie du condensateur étudié en contact direct avec les armatures,
- B Partie du condensateur étudié ne touchant pas directement les armatures,
- C Condensateur à air en série avec le condensateur étudié aux endroits où le contact est mauvais,
- D Fuites superficielles du diélectrique,
- E Conductance ohmique des armatures.

Suivant que telle ou telle de ces quantités prédominera, les phénomènes pourront varier avec la fréquence suivant des lois bien différentes.

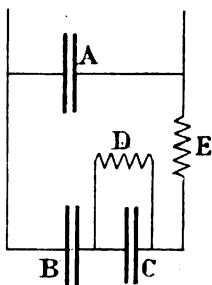


Fig. 41.

Avec le mercure et l'argent déposé chimiquement, lorsque les armatures ont même hauteur, les essais sont corrects.

Avec l'eau, la surface du diélectrique devient conductrice ; il en résulte une augmentation de la capacité et de l'angle de perte d'autant plus importante que la fréquence est moins élevée.

Avec le papier d'étain, les points de contact entre le diélectrique et l'armature sont rares, la capacité est donc toujours plus petite qu'avec le mercure. A haute fréquence, l'angle de perte est plus petit qu'avec le mercure à cause de la présence d'air, mais, aux fréquences téléphoniques, par suite de la conductance superficielle, il devient plus grand qu'avec le mercure.

Enfin, avec la limaille de fer, la conductance des armatures est faible ; ça n'a aucune importance en courant continu, mais rend les pertes d'autant plus grandes et la capacité d'autant plus petite que la fréquence est elle-même plus élevée.

VII. INFLUENCE DE LA FORME DE LA TENSION. — Dans les chapitres précédents, les condensateurs étaient soumis à une tension sinusoïdale; il est intéressant d'examiner le cas de tensions périodiques quelconques.

Toutes les méthodes ne conviennent évidemment pas pour cette étude; celle du pont, en particulier, est inapplicable. J'ai utilisé le balistique pour des fréquences très basses et des ondes voisines de la sinusoïdale, le calorimètre dans le cas de fréquences élevées et de tensions riches en harmoniques.

A. — Dans les essais au balistique, pour obtenir une courbe

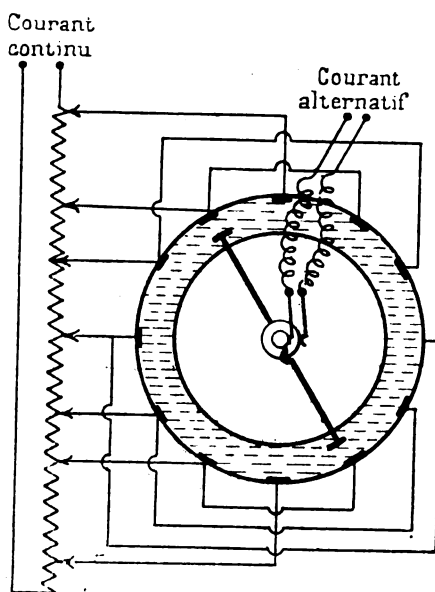


Fig. 42.

de tension variable à volonté, j'ai remplacé (fig. 42) la cuvette rectangulaire par un canal circulaire compris entre les parois de deux cristallisoirs concentriques. 12 électrodes équidistantes étaient réunies deux par deux à différents points d'un rhéostat métallique alimenté sous 110 volts. J'obtenais ainsi une courbe de tension aplatie ou pointue selon que les prises de courant sur le rhéostat étaient voisines des extrémités ou du milieu; en ne conservant que les deux électrodes extrêmes, je réalisais une répartition linéaire du potentiel.

J'ai opéré sur un condensateur au papier paraffiné, à une fréquence de 1,3 p.s. Pour faciliter la comparaison, les résultats

contenus dans le tableau suivant ont été tous ramenés par le calcul à une même tension maximum, ce qu'il aurait été délicat de réaliser expérimentalement.

ONDE SINUSOÏDALE			ONDE LINÉAIRE		
Degrés	Volts	Microcoulombs	Degrés	Volts	Microcoulombs
0	0	— 30	0	0	— 31
30	31	— 14	15	11,5	— 23
60	51	10	30	22	— 12
90	60	32	45	35	3
120	53	45	60	50	21
150	32	43	75	58	30
180	1	31	90	59	40
			120	40	41
			150	20	37
			180	— 1	28

ONDE POINTUE			ONDE APLATIE		
Degrés	Volts	Microcoulombs	Degrés	Volts	Microcoulombs
0	1	— 18	0	1,5	— 37
30	5	— 15	15	42	— 18
60	22	— 4	30	51	— 7,5
75	40	8	60	59	12
82	56	14	90	60	30
90	60	24	120	57	48
98	57	30	150	48	51
105	42	29	165	24	45
120	23	24	180	0	35
150	4	17			
180	0	16			

Les figures 43 et 44 représentent les différentes formes d'onde, ainsi que les cycles de viscosité correspondants ; j'ai construit également les courbes représentant le carré des tensions instantanées ; par intégration graphique, j'ai déterminé les tensions efficaces et les pertes :

	Onde sinusoïdale	Onde linéaire	Onde pointue	Onde aplatie
Tension efficace en volts	42,2	33,5	25,5	47,5
Pertes en ergs : seconde	62 000	41 500	25 300	83 000

Le quotient des pertes par le carré des tensions efficaces prend les valeurs suivantes :

Onde sinusoïdale	Onde linéaire	Onde pointue	Onde aplatie
34,5	36,5	38,5	37

Ce rapport est à peu près indépendant de la forme de l'onde. Dans cet exemple, les pertes ne dépendent donc que de la tension efficace.

B. — On doit s'attendre à ce que les conclusions précédentes ne soient plus valables lorsque l'importance des harmoniques est considérable. Pour mettre ce fait en évidence, j'ai utilisé une

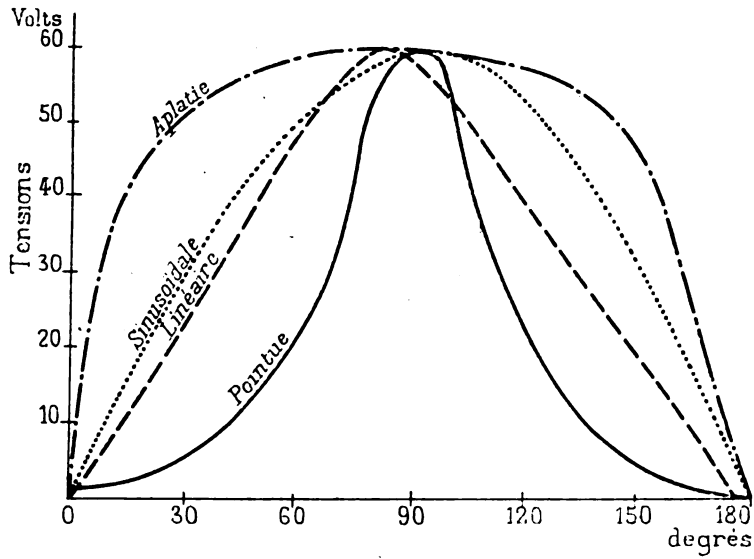


Fig. 43

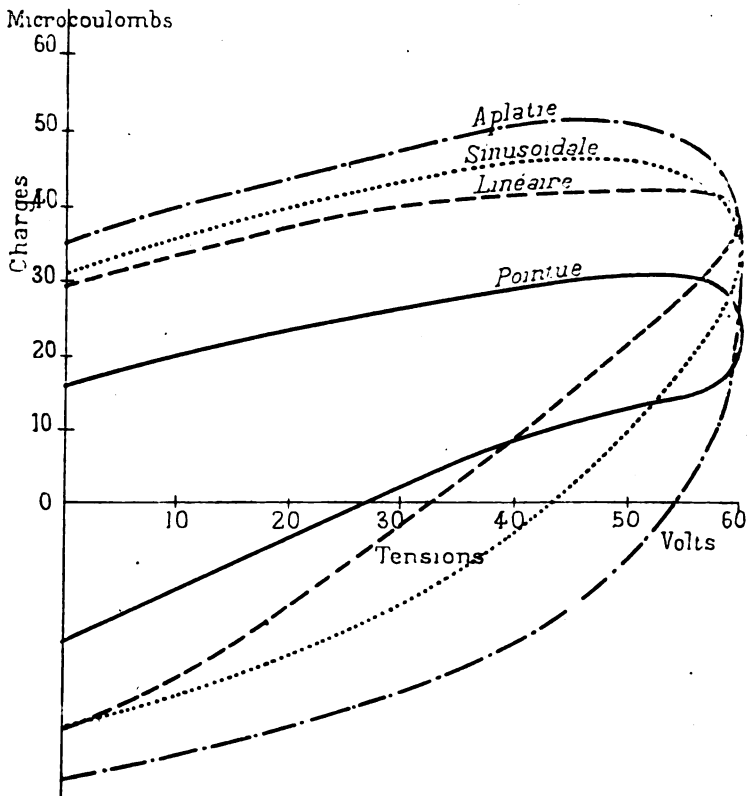


Fig. 44.

tension aussi rectangulaire que possible; il m'a fallu dans ces mesures, renoncer à tracer le cycle de viscosité et employer la méthode calorimétrique. Voici le dispositif adopté :

La tension appliquée au condensateur est tantôt sinusoïdale, tantôt rectangulaire. La première est fournie par un petit alternateur homopolaire dont le fer tournant porte 12 dents, et dont l'onde fondamentale est mise en résonance.

La tension rectangulaire est obtenue de la manière suivante :

L'arbre de l'alternateur porte un balai qui frotte sur 24 secteurs; ceux-ci, alternativement positifs et négatifs, sont connectés, à travers une lampe de sécurité, aux fils extrêmes d'une canalisation à 2×110 volts. Le condensateur, relié au balai et au fil neutre de la distribution est ainsi soumis à une tension rectangulaire dont l'ordonnée maximum est 110 volts.

Dans les deux cas, la période est la même; la tension efficace est indiquée par un voltmètre thermique branché en permanence aux bornes du condensateur.

J'ai étudié ainsi un condensateur à diélectrique presspahn; ses pertes, que j'avais eu l'occasion de mesurer précédemment en courant sinusoïdal étaient sensiblement proportionnelles à la fréquence; il me semblait par suite tout indiqué pour exagérer l'influence des harmoniques.

Voici les résultats obtenus dans un essai à la fréquence 335 p:s :

1° Onde sinusoïdale :

Tension efficace : 103 volts.

Echauffement au bout de 10 m : $0^{\circ}13$.

2° Onde rectangulaire :

Tension maxima : + 109 et — 106 volts.

Tension efficace : 92 volts.

Echauffement au bout de 5 m : $0^{\circ}24$.

Ainsi, la puissance perdue dans le cas de l'onde rectangulaire est, dans cet exemple, $\frac{0,24}{0,13} \times \frac{103^2}{92^2} \times \frac{10}{5} = 4,6$ fois plus grande que pour l'onde sinusoïdale de même tension efficace.

C. — *Conclusion.* — Pour des ondes s'écartant peu de la sinusoïdale, les pertes ne dépendent que de la tension efficace. Au contraire, lorsque les harmoniques ont une amplitude exceptionnelle, les pertes sont nettement plus grandes que sous tension sinusoïdale. Le calcul me permettra ultérieurement de préciser ces conclusions.

CHAPITRE V

PARTIE THEORIQUE

I. THÉORIE MATHÉMATIQUE. — A. — Une théorie des diélectriques peut être envisagée à deux points de vue indépendants, l'un mathématique, l'autre physique. Le problème que l'on doit résoudre est, en effet, double; il consiste d'une part à rechercher dans le diélectrique quels sont les éléments actifs, d'autre part, à imaginer pour eux des lois simples et à en déduire des résultats vérifiés par l'expérience. Il est indifférent d'en commencer l'étude par l'une ou l'autre de ces parties ; je considérerai d'abord l'aspect mathématique de la question.

Une particule électrisée contenue dans un diélectrique est soumise, lorsqu'elle se déplace, à des forces de restitution quasi-élastiques. Pour les fréquences peu élevées dont je m'occupe, ces particules ne peuvent prendre qu'un mouvement apériodique, par suite de l'importance des frottements et de la petitesse relative de leur masse mécanique.

J'examinerai donc le mouvement de charges électriques sensiblement dépourvues de masse mécanique, placées dans un champ de force et soumises de la part du milieu à des réactions élastiques, avec frottement constant ou proportionnel à la vitesse. Je tiens à préciser, dès à présent, que, dans tout ce chapitre, à moins de spécification contraire, *je ne m'occuperai que des charges résiduelles et des angles de perte correspondants*, laissant de côté les charges instantanées proportionnelles aux champs ; d'ailleurs, pour éviter toute confusion, j'accentuerai les quantités résiduelles, lorsqu'elles seront différentes des quantités totales.

B. — EXAMEN DE QUELQUES CAS THÉORIQUES. LOIS QUE L'ON PEUT EN DÉDUIRE. — Soit Q' la quantité d'électricité résiduelle qui a traversé une section droite du diélectrique, U la tension entre les armatures.

1° *Milieu non élastique (aucune force de restitution), frottement proportionnel à la vitesse.* — On obtient immédiatement l'équation :

$$\frac{dQ'}{dt} = -\lambda U, \quad \lambda \text{ étant le coefficient de viscosité.}$$

Si U est constant, Q' croît indéfiniment.

Si U est sinusoïdal, de la forme $U_m \sin \omega t$ par exemple, et si

pour $t = 0$, on a $Q' = 0$ et $\frac{dQ'}{dt} = 0$, l'intégration donne :

$$Q' = \frac{\lambda U_m}{\omega} (I - \cos \omega t).$$

Le cycle obtenu (fig.45) en portant U en abscisses et Q' en ordonnées est une ellipse dont les axes sont parallèles à ceux des coordonnées.

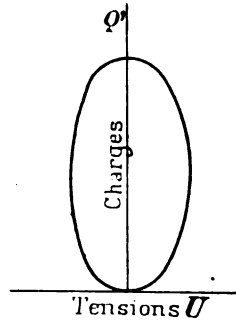


Fig. 45.

données, mais dont le centre n'est pas à l'origine. Sa surface varie en raison inverse de ω ; la puissance absorbée est indépendante de la fréquence ; l'angle de perte α est toujours égal à $\frac{\pi}{2}$.

2° Milieu élastique, frottement constant. — L'équation fondamentale est :

$$Q' = kU \pm h, h \text{ étant le coefficient de frottement.}$$

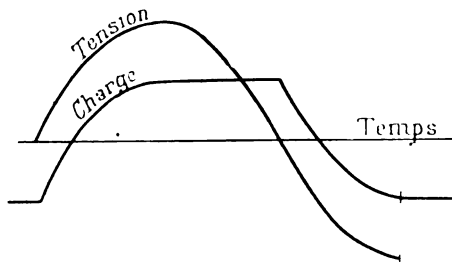


Fig. 46.

En courant alternatif, la charge est représentée en fonction du temps par des portions de sinusôides et de droites horizontales (fig. 46). Le cycle représentant Q' en fonction de U est un parallélogramme indépendant de la fréquence, mais dont la surface n'est pas proportionnelle au carré de la tension (fig. 47).

3° *Milieu élastique, frottement proportionnel à la vitesse.* —

L'équation à intégrer est : $Q' + \frac{1}{\lambda} \frac{dQ'}{dt} = kU$. $\frac{1}{\lambda}$ étant encore le coefficient de viscosité et k la capacité résiduelle maximum en courant continu.

Si l'on opère en courant continu, si par exemple on décharge le condensateur primitivement chargé sous la tension U , la décharge se fera suivant la loi :

$$Q' = kUe^{-\lambda t}$$

Si, au contraire, on emploie du courant alternatif, la quantité Q' se composera de deux termes, l'un exponentiel, l'autre sinu-

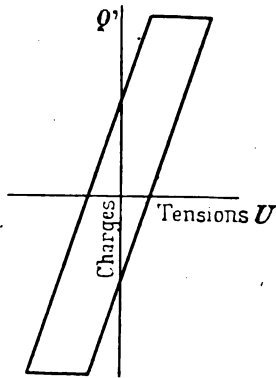


Fig. 47.

soïdal qui est le seul intéressant; on trouve facilement, par substitution la valeur de ce dernier :

$$Q' = Q'_{\max} \sin (\omega t - \alpha') \quad \text{avec } Q'_{\max} = k U_m \cos \alpha' \quad \text{et } \operatorname{tg} \alpha' = \frac{\omega}{\lambda}.$$

Ainsi donc, au bout d'un certain temps, la charge est sinusoïdale et en retard sur la tension. Le cycle représentant Q' en fonction de U finit par devenir une ellipse dont les axes sont inclinés par rapport à ceux des coordonnées, mais dont le centre est à l'origine quelles que soient les conditions initiales; on a vu qu'il n'en était pas de même lorsque l'élasticité était nulle.

L'énergie perdue par cycle est, d'autre part, égale au produit de la tension efficace par la charge active efficace :

$$W = \frac{1}{2} U_m Q'_m \sin \alpha' = \frac{k}{2} U_m^2 \cos \alpha' \sin \alpha' = \frac{k}{4} U_m^2 \sin 2 \alpha'.$$

Elle varie avec la fréquence, s'annule pour $\omega = 0$ et $\omega = \infty$

et passe par un maximum pour $\sin 2 \alpha' = 1$, c'est-à-dire $\alpha' = \frac{\pi}{4}$ et $\omega = \lambda$. Ce maximum est égal à l'énergie qu'aurait emmagasinée au bout d'un temps infini le diélectrique alimenté sous une tension constante dont la valeur serait égale à celle de la tension alternative efficace.

L'angle de perte α' a pour limites $\frac{\pi}{2}$ en haute fréquence et zéro à basse fréquence.

C. *Désaccord entre les lois théoriques précédentes et les résultats expérimentaux.* — Il reste maintenant à chercher parmi les lois que je viens d'énoncer celle qui est le mieux vérifiée par l'expérience.

1° Tout d'abord, il faut évidemment écarter le cas où les forces de restitution sont nulles ;

2° Un frottement constant correspond à une perte par cycle constante, ce qui est à peu près vérifié à haute fréquence ⁽¹⁾. Mais la décharge d'un condensateur ne pourrait jamais être complète et son diélectrique resterait toujours polarisé ; cette hypothèse admissible en magnétisme est ici complètement à rejeter.

3° Enfin, un cas qui mérite une discussion plus approfondie est celui où les forces élastiques coexistent avec un frottement proportionnel à la vitesse. Il permet d'expliquer convenablement les déformations du cycle avec la fréquence, mais je dois le rejeter quand même pour les raisons suivantes :

a) *Courant continu.* — Quel que soit le régime auquel a été soumis le condensateur avant sa mise en court-circuit, la décharge devrait être exponentielle.

Or, l'expérience montre que :

Après une tension constante de très longue durée, l'intensité du courant de décharge est généralement représentée par une fonction de la forme : $i = At^{-n}$ ⁽²⁾.

Après plusieurs tensions alternativement positives et négatives,

(1) Certains auteurs superposent dans les diélectriques une « viscosité » et une « hystérésis », la première due à un frottement fonction de la vitesse et surtout sensible à basse fréquence, la deuxième due à un frottement constant et qui existe seule à haute fréquence. Je ne puis adopter cette manière de voir parce que, même à très haute fréquence, le courant reste sinusoïdal et le cycle elliptique.

(2) TRUTTON et RUSS (*Proceedings of the Physical Society*, vol. 20, p. 551, 1907) ont pourtant obtenu expérimentalement une fonction de la forme :

$$i = \frac{A}{t + b}$$

le courant de décharge peut même changer plusieurs fois de sens.

b) *Courant alternatif*. — La perte d'énergie par cycle devrait passer par un maximum pour $\alpha' = \frac{\pi}{4}$.

La puissance perdue devrait devenir constante à haute fréquence.

Or, l'expérience montre que ces résultats ne sont pas vérifiés ; la perte d'énergie par cycle ne passe pas par un maximum pour $\alpha' = \frac{\pi}{4}$; la puissance perdue par seconde est sensiblement proportionnelle à la fréquence pour les ondes hertziennes.

D. *Hypothèse complémentaire*. — Les hypothèses précédentes n'ayant pas été confirmées par l'expérience, il convient, sans les compliquer outre mesure, de leur donner plus de souplesse.

Une remarque expérimentale y contribue facilement :

Tous les auteurs qui se sont occupés de mauvais condensateurs ont été frappés des différences notables que présentaient les résultats obtenus avec des diélectriques de même espèce ; des condensateurs de même fabrication et aussi les différentes subdivisions d'un même condensateur ne donnent pas des résultats identiques.

On est donc amené expérimentalement à considérer un condensateur réel comme formé par la réunion d'un certain nombre de condensateurs élémentaires ne possédant pas le même angle de perte. Pour la commodité du calcul et parce que les propriétés du diélectrique ne peuvent pas varier brusquement entre deux points très voisins, je supposerai que le nombre de ces condensateurs est infini.

Ces considérations permettent de retoucher les calculs faits précédemment et je vais d'abord examiner qualitativement les modifications qu'elles y apportent.

Frottement constant. — Le cycle est formé par la superposition d'un nombre infini de parallélogrammes décalés les uns par rapport aux autres et ressemble à une courbe d'aimantation du fer (fig. 48). Il reste indépendant de la fréquence, mais varie en fonction de la tension suivant une loi complexe. Ces résultats sont évidemment contraires à l'expérience.

Frottement proportionnel à la vitesse. — En courant continu, la décharge est représentée par une somme d'exponentielles qui

n'est plus une exponentielle ; en choisissant convenablement les exponentielles élémentaires, on peut obtenir une courbe de décharge qui soit d'accord avec l'expérience.

En courant alternatif, l'intensité est représentée par une somme de sinusoïdes *qui est encore une sinusoïde*. Le cycle est encore une ellipse qui se déforme en fonction de la période suivant une loi dont on dispose.

Il reste donc à trouver une fonction convenable pour représenter la capacité du condensateur élémentaire correspondant à un angle de perte déterminé. Cette fonction doit être simple pour que les résultats obtenus puissent être soumis au contrôle de l'ex-

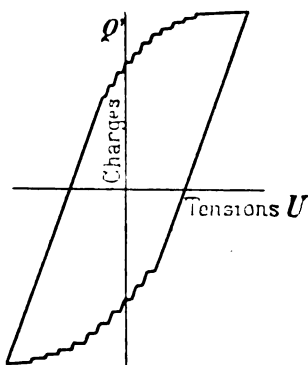


Fig. 48.

périence, posséder une grande valeur pour de faibles angles de perte et tendre vers zéro quand ces derniers tendent vers $\frac{\pi}{2}$; j'ai obtenu des résultats convenables avec une fonction proportionnelle à une certaine puissance de la variable.

E. Développement des calculs. — a) *Courant continu*. Soit $\frac{1}{\lambda}$ le coefficient de viscosité d'un condensateur élémentaire, alimenté sous la tension U. Soit U. dA la valeur initiale du courant de charge ⁽¹⁾ ; au bout d'un temps t ce courant élémentaire aura pour valeur

$$di = U. dA. e^{-\lambda t}$$

⁽¹⁾ Pour fixer les idées, si le condensateur élémentaire présentant de la viscosité est assimilable à une capacité parfaite C en série avec une résistance R, on a : $dA = \frac{1}{R}$ et $\lambda = \frac{1}{CR}$.

L'intensité totale I' dans le condensateur réel est la somme de toutes ces intensités élémentaires :

$$I' = \int_{\lambda=0}^{\infty} U \cdot dA \cdot e^{-\lambda t}.$$

Pour aller plus loin, il faut relier dA à λ . Pour obtenir finalement une loi conforme à l'expérience (1), je suis conduit à poser :

$$dA = M \lambda^{n-1} d\lambda \quad \text{d'où} \quad I' = MU \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \lambda^{n-1} d\lambda.$$

Cette intégration s'effectue au moyen du changement de variable $\lambda t = u$; j'obtiens :

$$I' = MU \int_0^{\infty} e^{-u} \left(\frac{u}{t}\right)^{n-1} \frac{du}{t} = MU t^{-n} \int_0^{\infty} e^{-u} u^{n-1} du = MU \Gamma(n) t^{-n}.$$

en représentant par Γ l'intégrale eulérienne de seconde espèce.

Pour un condensateur déterminé, $MU \Gamma(n)$ étant constant, le courant varie bien proportionnellement à la puissance- n du temps. Je puis donc considérer la fonction λ^{n-1} comme acceptable, puisqu'en courant continu elle me permet de retrouver les résultats expérimentaux. Il ne me reste plus qu'à l'appliquer en alternatif.

b) *Courant alternatif*. Soit $U_m \sin \omega t$ la tension appliquée au condensateur ; l'intensité maximum en alternatif est $\sin \alpha'$ fois plus grande que l'intensité initiale en continu ; l'intensité élémentaire maximum est donc :

$$di' = U_m dA \sin \alpha'.$$

Les intensités élémentaires active en phase avec la tension et réactive en quadrature, s'obtiennent en multipliant la précédente par $\sin \alpha'$ et $\cos \alpha'$.

$$di_a = U_m \cdot dA \cdot \sin^2 \alpha' = U_m \frac{dA}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}$$

$$di_r = U_m dA \cdot \sin \alpha' \cos \alpha' = \frac{U_m}{\omega} \cdot \frac{\lambda dA}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}.$$

Si l'on relie dA à λ par la relation $dA = M \lambda^{n-1} d\lambda$ on obtient pour les intensités totales :

$$I_a = MU_m \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{n-1} d\lambda}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}} \quad I_r = \frac{MU_m}{\omega} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^n d\lambda}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}.$$

(1) En posant $dA = Me^{-b\lambda} d\lambda$ on obtiendrait la loi en $\frac{A}{t+b}$ trouvée expérimentalement par Trutton et Russ.

Pour calculer I_a je pose : $\lambda^2 = \omega^2 u$,

$$I_a = \frac{M U_m}{2} \omega^n \int_0^\infty u^{\frac{n}{2}-1} \frac{du}{1+u} = \frac{M U_m}{2} \omega^n B\left(\frac{n}{2}, 1-\frac{n}{2}\right) \\ = \frac{M U_m}{2} \omega^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)$$

en désignant par B l'intégrale eulérienne de 1^o espèce. De même :

$$I_r = \frac{M U_m}{2} \omega^n \int_0^\infty u^{\frac{n}{2}-1} \frac{du}{1+u} = \frac{M U_m}{2} \omega^n B\left(\frac{1-n}{2}, 1-\frac{n}{2}\right) \\ = \frac{M U_m}{2} \omega^n \Gamma\left(\frac{1-n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right).$$

Les calculs précédents font apparaître immédiatement un certain nombre de relations simples entre les quantités résiduelles :

L'intensité active I_a et par suite la puissance dissipée par viscosité sont proportionnelles à la n^e puissance de la fréquence.

L'intensité réactive I_r varie de la même manière.

L'angle de perte α' (relatif aux résidus seulement) est indépendant de la fréquence.

Les intensités alternatives active et réactive correspondant à la période T sont proportionnelles à l'intensité continue I_c au bout du temps T ; les coefficients de proportionnalité, pour des tensions maximum égales sont :

$$\frac{I_a}{I_c} = \frac{(2\pi)^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)} \\ \frac{I_r}{I_c} = \frac{(2\pi)^n \Gamma\left(\frac{1-n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)}.$$

Le rapport des charges ou des capacités se déduit facilement du rapport des intensités en le multipliant par $\frac{2\pi}{1-n}$. On obtient

(1) J'aurais pu poser directement :

$$I_a = \int_0^\infty \int_0^\infty U_m \omega \sin \omega t \cdot M \lambda^{n-1} \cdot e^{-\lambda t} dt d\lambda, \\ I_r = \int_0^\infty \int_0^\infty U_m \omega \cos \omega t \cdot M \lambda^{n-1} \cdot e^{-\lambda t} dt d\lambda.$$

Le calcul tel que je l'ai conduit revient à commencer l'intégration par rapport à dt . En commençant par $d\lambda$ on obtiendrait les formules :

$$I_a = M U_m \omega^n \frac{\pi}{2 \cos(1-n)} \quad I_r = M U_m \omega^n \Gamma(n) \Gamma(1-n) \cos(1-n) \frac{\pi}{2}$$

qui peuvent être plus commodes dans certains cas.

ainsi entre la composante C_i en phase avec la tension de la capacité résiduelle en courant alternatif, la composante C_a en quadrature avec la tension de la capacité en courant alternatif, et la capacité résiduelle C'_c en courant continu les relations :

$$\frac{C_a}{C'_c} = \frac{(2\pi)^{n-1} (1-n) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)}$$

$$\frac{C'_r}{C'_c} = \frac{(2\pi)^{n-1} (1-n) \Gamma\left(\frac{1-n}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1+n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)}$$

En vue de faciliter l'application de ces formules, j'ai calculé pour quelques valeurs de n les rapports précédents (fig. 49).

n	$\frac{I_a}{I_c}$	$\frac{I'_r}{I'_c}$	$\frac{C_a}{C'_c}$	$\frac{C'_r}{C'_c}$	$\lg x$
0	1	0	0,16	0	∞
0,1	1,27	0,202	0,18	0,027	6,3
0,2	1,60	0,52	0,20	0,062	3,08
0,3	1,97	1,02	0,22	0,113	1,93
0,4	2,50	1,82	0,24	0,175	1,37
0,5	3,28	3,28	0,26	0,26	1
0,6	3,95	5,50	0,25	0,345	0,72
0,7	4,95	9,50	0,235	0,46	0,515
0,8	6,22	21,2	0,198	0,61	0,295
0,9	7,83	49,2	0,125	0,78	0,160
1	9,85	∞	0	1	0

Ainsi, l'étude en continu d'un condensateur permet de prédéterminer sa capacité et ses pertes en alternatif.

Pour fixer les idées et préciser les notations, je vais appliquer la théorie précédente à un condensateur à mica étudié en courant continu par M. Bouty ⁽¹⁾ ; sa capacité était représentée en fonction du temps par la formule :

$$C = I + 0,034 T^{0,1} \text{ microfarads.}$$

On a ici $1-n = 0,1$ et le tableau donne pour $n = 0,9$ les rapports suivants :

$$\frac{C_a}{C'_c} = 0,125$$

$$\frac{C'_r}{C'_c} = 0,78$$

La capacité totale réactive en courant alternatif (charge instantanée et résidus) est donc, pour la période T :

$$C = I + 0,034 \times 0,78 \times T^{0,1}.$$

⁽¹⁾ BOUTY. *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e série, tome XXIV, p. 391. 1891.

La capacité totale définie au balistique ne diffère de la précédente que d'une quantité insignifiante.

L'angle de perte réel, rapporté aux capacités précédentes a pour tangente :

$$\lg z = \frac{C_a}{1 + C_r} = \frac{0,034 \times 0,125 \times T^{0,1}}{1 + 0,034 \times 0,78 \times T^{0,1}} = \frac{0,00425}{0,0265 + T^{0,1}}.$$

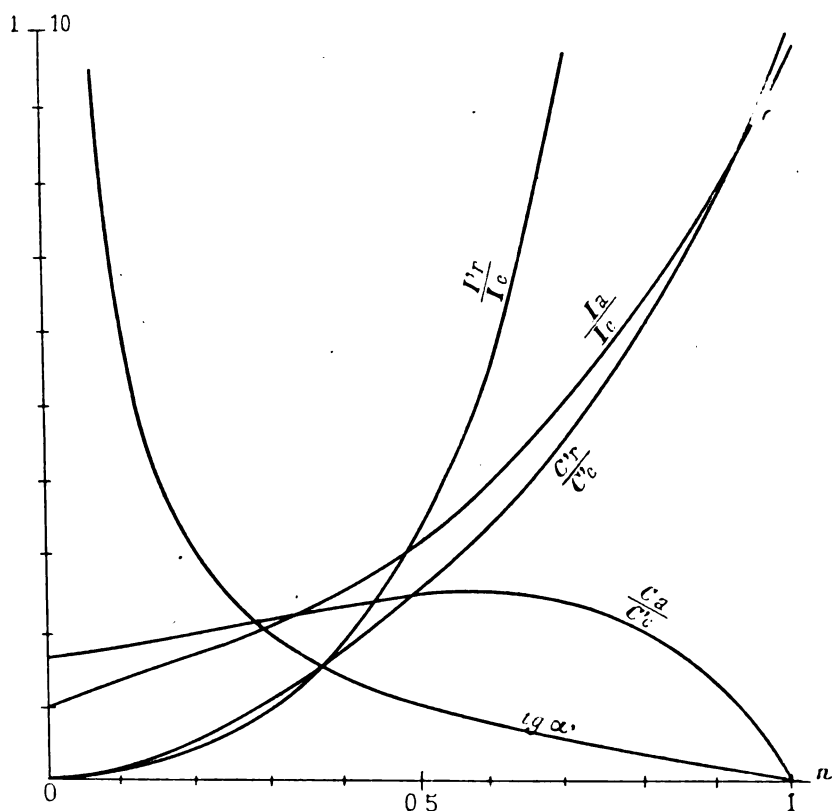


Fig. 49.

Pour les fréquences 100 000, 1, et 0,001, ces formules donnent les nombres suivants :

T	0,00001	1	1 000
C	1,010	1,026	1,068
$\lg z$	0,00132	0,00415	0,0081

II. VÉRIFICATION DE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE : COMPARAISON DES CAPACITÉS EN COURANTS CONTINU ET ALTERNATIF. — A. Je viens d'établir théoriquement que les pertes sont proportionnelles à la n° puissance de la fréquence; cette conclusion est conforme

à mes résultats expérimentaux. Il me reste, pour vérifier les calculs précédents à montrer que le coefficient de proportionnalité mesuré est bien celui que prévoit la théorie. Cette vérification peut se faire soit sur les intensités, soit sur les capacités. J'ai opéré sur ces dernières, qui sont directement obtenues avec les méthodes usuelles.

Pour les fréquences 50 et 870, j'ai utilisé le pont de Wien ; l'appareil de zéro était un galvanomètre de résonance dans le premier cas, un téléphone dans le second. Pour la fréquence 2, j'ai employé la méthode du balistique.

Enfin, les mesures en courant continu ont été faites au moyen d'un contact tournant de grandes dimensions. Celui-ci chargeait le condensateur durant $\frac{29}{30}$ de tour puis le déchargeait durant $\frac{1}{30}$ de tour, dans le balistique fonctionnant en ampèremètre ; le temps de la décharge était déduit de la vitesse du moteur d'entraînement ; l'ensemble était ensuite étalonné avec un condensateur à mica. Cependant, pour des durées supérieures à une seconde, la commutation était effectuée à la main. Naturellement, les résultats n'étaient relevés qu'après quelques minutes de fonctionnement.

Il convient de ne procéder qu'en dernier lieu aux mesures en courant continu, sans quoi les charges résiduelles emmagasinées pendant cet essai rendraient impossibles les mesures à la fréquence 2.

B. — Condensateur N° 12 (papier paraffiné)

1° Courant alternatif (résultats expérimentaux)

Fréquence	Capacité	$\lg \alpha$
870 p.s	1,85 μ F	0,053
50	2,11	0,110
2	2,52	0,205

Il est à remarquer que la capacité obtenue au pont n'est pas celle que fournirait le balistique ; j'ai montré que pour déterminer cette dernière, il suffisait, lorsque les fuites sont négligeables, de multiplier par $\cos \alpha$ la capacité mesurée. Cette correction est ici négligeable, mais il faudrait en tenir compte pour de plus mauvais condensateurs.

2° Courant continu (résultats expérimentaux)

Durée de la décharge en sec.	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{40}$	1	10
Capacité en μF	2,38	2,92	4,5	6,2

Ces essais font seulement connaître la somme C de la capacité résiduelle et de la capacité instantanée C_0 . Afin de déterminer cette dernière, il eût été intéressant de faire un essai à très haute fréquence, mais c'était malheureusement impossible pour une capacité si considérable. J'en ai été réduit à essayer plusieurs valeurs de C_0 jusqu'à ce que, en coordonnées logarithmiques, la courbe des capacités résiduelles en courant continu $C - C_0 = f(T)$ soit sensiblement rectiligne. J'ai obtenu ainsi : $C_0 = 1,7 \mu F$ et $n = 0,65$. Pour vérifier la théorie, je vais, en partant de ces résultats, obtenus en courant continu, calculer la capacité et l'angle de perte en alternatif, puis je comparerai les valeurs ainsi calculées aux résultats expérimentaux :

A cette valeur de n correspondent les rapports suivants :

$$\frac{C_a}{C_c} = 0,245 \qquad \frac{C_r}{C_c} = 0,40.$$

Les capacités résiduelles en courant continu correspondant à $\frac{1}{2}$ sec., $\frac{1}{50}$ de sec. et à $\frac{1}{870}$ de sec. s'obtiennent par interpolation ; elles ont pour valeur :

Temps en secondes	$\frac{1}{870}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{2}$
C_c en μF	0,48	1,1	2,4

On en déduit les valeurs théoriques en courant alternatif :

Fréquence p.s	Capacité totale réactive en μF	Capacité totale en μF	tg α
870	$1,7 + 0,48 \times 0,4 = 1,90$	$\sqrt{1,90^2 + (0,245 \times 0,48)^2} = 1,90$	$\frac{0,48 \times 0,245}{1,90} = 0,062$
50	$1,7 + 1,1 \times 0,4 = 2,14$	$\sqrt{2,14^2 + (0,245 \times 1,1)^2} = 2,16$	$\frac{1,1 \times 0,245}{2,16} = 0,125$
2	$1,7 + 2,4 \times 0,4 = 2,66$	$\sqrt{2,66^2 + (0,245 \times 2,4)^2} = 2,78$	$\frac{2,4 \times 0,245}{2,78} = 0,21$

On vérifie que ces nombres, quoique n'étant pas identiques à ceux que donne la mesure directe ne s'en écartent pourtant pas beaucoup (fig. 50).

C. Condensateur N° 5 (papier paraffiné)

1° Courant alternatif

Fréquence	Capacité	$\text{tg } \alpha$
p:s	μF	
870	0,91	0,10
50	1,64	0,53
2	2,95	1,05

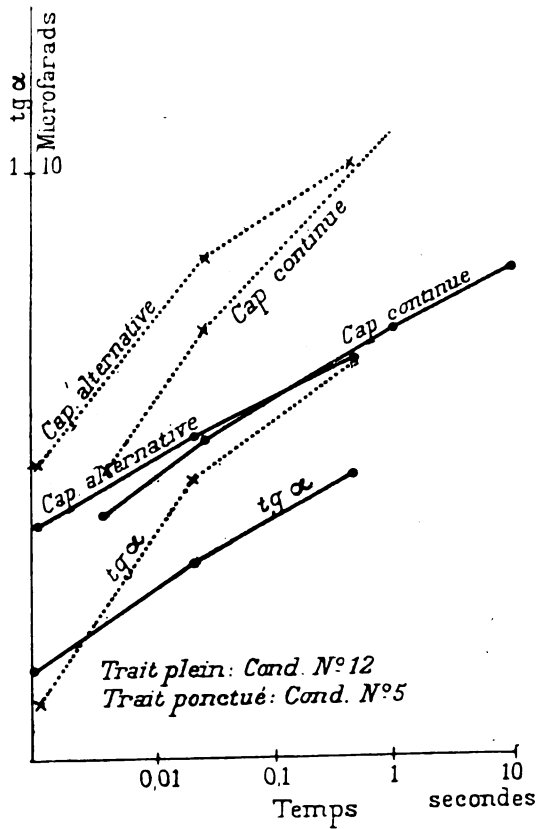


Fig. 50.

Il convient d'apporter une correction à la valeur mesurée pour 50 p:s ; en la multipliant par $\cos \alpha$, on obtient 1,42.

2° Courant continu

Durée de la décharge en seconde	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{40}$	1	10
Capacité en μF	1,72	3,65	14,7	41,5

J'en ai déduit comme précédemment :

$$C_0 = 0,75 \mu F \quad n = 0,45$$

Pour cette valeur de n on a :

$$\frac{C_a}{C_r} = 0,25 \quad \frac{C'_r}{C_c} = 0,22$$

D'autre part, on obtient par interpolation les valeurs suivantes en courant continu :

Temps en seconde	$\frac{1}{870}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{2}$
C_c en μF	0,4	2,5	12

d'où l'on déduit par le calcul :

Fréquence p/s	Capacité totale reactive en μF	Capacité totale en μF	tg α
870	$0,75 + 0,4 \times 0,22 = 0,84$	$\sqrt{0,84^2 + (0,4 \times 0,25)^2} = 0,84$	$\frac{0,4 \times 0,25}{0,84} = 0,119$
50	$0,75 + 2,5 \times 0,22 = 1,30$	$\sqrt{1,30^2 + (2,5 \times 0,25)^2} = 1,45$	$\frac{2,5 \times 0,25}{1,30} = 0,48$
2	$0,75 + 12 \times 0,22 = 3,40$	$\sqrt{3,40^2 + (12 \times 0,25)^2} = 4,5$	$\frac{12 \times 0,25}{3,40} = 0,88$

D. *Remarque.* — La courbe représentant la capacité en courant continu n'est pas rigoureusement rectiligne ; il ne pourrait d'ailleurs en être ainsi que dans un espace assez restreint, la formule en t^{1-n} d'origine empirique n'étant valable qu'entre certaines limites.

La charge emmagasinée en continu est en effet égale à $\frac{MUT(n)t^{1-n}}{1-n}$. Si cette quantité est finie pour les valeurs finies de t , c'est que le coefficient de t^{n-1} est fini. Donc, elle est infinie pour $t = 0$ si $n > 1$, pour $t = \infty$ si $n \leq 1$; or, cela est physiquement impossible, un volume limité de diélectrique ne pouvant emmagasiner une quantité infinie d'électricité.

Une variation lente de n s'impose donc. Il en résulte un peu d'incertitude sur la valeur à adopter pour n . Malgré cela, l'accord entre les nombres calculés et observés est satisfaisant, surtout si l'on tient compte de la difficulté des mesures et de la diversité des méthodes employées.

Parmi les relations établies, celle qui relie C_a et C_r est la plus intéressante aux fréquences usuelles parce que dans ces conditions, les mesures sont beaucoup plus faciles en courant alternatif qu'en courant continu. Au contraire, pour des temps

relativement longs, il est extrêmement facile de mesurer la capacité en courant continu et d'en déduire les pertes en courant alternatif.

III. APPLICATION DE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE. — 1. *Etude théorique de l'influence des harmoniques.* — 1° L'expérience ayant vérifié avec une approximation suffisante les lois théoriques précédemment établies, on a le droit de les appliquer à la solution d'un certain nombre de problèmes ; en particulier, il est intéressant de rechercher l'influence que peut avoir sur les pertes la forme de la courbe de tension.

On peut évidemment recommencer pour chaque fonction particulière un calcul analogue au précédent, mais il est en général plus simple de la développer en série de Fourier.

On remarque immédiatement que, à tension efficace égale, les pertes sont d'autant plus élevées que l'importance des harmoniques est plus grande. En effet, la perte totale est la somme des pertes produites par chaque harmonique ; dans le cas limite où n serait nul, ce qui équivaldrait à remplacer le condensateur par une résistance, cette perte ne dépendrait que de la tension efficace ; mais comme en réalité n est toujours supérieur à zéro, les pertes dues aux harmoniques, proportionnelles à la n^{e} puissance de leur rang sont exagérées. La fonction pour laquelle les pertes sont minimum, à tension efficace égale, est donc la sinusoïde.

Dans le courant du calcul, on rencontre des expressions dont la valeur devient illusoire pour certaines valeurs de ω et de n . Il est inutile de lever l'indétermination, ces cas limites n'ayant aucune signification physique. Les formules correspondantes, d'origine empirique, ne sont d'ailleurs plus valables, l'expression ω^n devenant infinie pour $\omega = 0$ ou $\omega = \infty$ quel que soit n et ce dernier nombre ne pouvant atteindre les limites 0 ou 1 sans donner au condensateur une capacité infinie. Je me bornerai dans ces conditions, à calculer les valeurs numériques des quantités intéressantes pour des valeurs de n voisines de 0 et de 1, par exemple 0,1 et 0,9.

Pour préciser, je considérerai les cas où la tension d'alimentation peut être représentée par une série de triangles ou de rectangles.

2° Triangles isocèles (*tension linéaire périodiquement inversée*). — Dans ce cas, la tension est égale à l'expression :

$$f(t) = \frac{8 U_m}{\pi^2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3 \omega t + \frac{1}{(2k+1)^2} \sin (2k+1) \frac{\pi}{2} \sin (2k+1) \omega t \right].$$

La tension maximum du $(2k+1)^\circ$ harmonique est :

$$U_{m(2k+1)} = \frac{8 U_m}{\pi^2} \times \frac{1}{(2k+1)^2}.$$

Son intensité wattée a pour valeur maximum :

$$I_{a(2k+1)} = \frac{M}{2} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \left[(2k+1) \omega\right]^n \cdot \frac{8 U_m}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(2k+1)^2}.$$

La perte d'énergie correspondante est donc :

$$W_{(2k+1)} = \frac{1}{2} U_{m(2k+1)} \times I_{m(2k+1)} = \frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \cdot (2k+1)^{n-4}.$$

La perte d'énergie pour la tension totale s'obtient en faisant la somme arithmétique de toutes les pertes partielles.

$$W = \frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right].$$

D'autre part, pour des triangles isocèles, le rapport entre la tension efficace et la tension maximum est $\frac{1}{\sqrt{3}}$; pour une sinusoïde, ce rapport est égal à $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Ainsi, pour une même tension maximum, le rapport entre les carrés des tensions efficaces des triangles et de la sinusoïde est $\frac{2}{3}$.

Revenons maintenant à l'expression de W et calculons le rapport entre cette énergie et celle qui serait dissipée sous une tension sinusoïdale de même valeur maximum U_m . Ce rapport est :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right]}{\frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n U_m^2} \\ \rho &= \frac{64}{\pi^4} \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right]. \end{aligned}$$

La série entre parenthèses est rapidement convergente pour $0 < n < 1$; sa limite est :

1,015 pour $n = 0$ et 1,05 pour $n = 1$.

Le rapport des pertes est donc pour $n = 0$:

$$\rho = \frac{64}{\pi^2} \times 1,015 = \frac{2}{3}$$

ce qui était à prévoir; pour $n = 1$, il devient:

$$\rho = \frac{64}{\pi^2} \times 1,05 = 0,69$$

résultat très peu différent.

Ainsi, si l'on soumet successivement le même condensateur à deux tensions de même valeur efficace, l'une sinusoïdale, l'autre triangulaire, les pertes dans les deux cas sont sensiblement les mêmes.

Remarque. — Le développement d'une tension parabolique ne diffère de celui d'une tension triangulaire que parce que les signes sont tous positifs au lieu d'être alternés. Il s'ensuit que les pertes sont rigoureusement identiques pour des tensions triangulaires et pour des tensions paraboliques de même valeur efficace.

3° Rectangles (*Tension continue périodiquement inversée*). — Le développement de cette tension en série de Fourier est :

$$f(t) = -\frac{4U_m}{\pi^2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{(2k+1)} \sin (2k+1)\omega t \dots \right]$$

Le carré de la valeur efficace est évidemment deux fois plus grand pour ces rectangles que pour la sinusoïde qui a même ordonnée maximum.

D'autre part, les pertes subies par un même condensateur alimenté successivement par ces deux tensions sont dans le rapport:

$$\rho = \frac{16}{\pi^2} \left[1 - \frac{1}{3^{n-2}} - \dots - \frac{1}{(2k+1)^{n-2}} - \dots \right]$$

Cette série ne converge plus aussi rapidement que la précédente; il est pourtant facile d'en obtenir une valeur approchée en l'assimilant à partir des termes d'un rang convenable à l'intégrale.

$$\int_0^\infty x^{n-2} dx = \frac{x^{n-1}}{1-n}$$

On obtient ainsi le tableau :

Valeur de n	0	0,1	0,9	1
Valeurs de ρ	2	2,34	16	∞

Ainsi donc, si deux condensateurs, l'un pour lequel $n = 0,1$, l'autre pour lequel $n = 0,9$ présentent des pertes égales sous tension sinusoïdale, le dernier sera, sous tension rectangulaire, le siège de pertes $\frac{16}{2,34} = 7$ fois plus importantes que le premier.

Mais, il ne faut pas perdre de vue que ces deux condensateurs quoique ayant les mêmes pertes pour l'onde fondamentale, ont des capacités résiduelles bien différentes. Leurs angles de perte résiduels ont en effet comme tangentes :

$$\text{Pour le premier : } \frac{\Gamma(0,05) \cdot \Gamma(0,95)}{\Gamma(0,55) \cdot \Gamma(0,45)} = 6,3,$$

$$\text{Pour le second : } \frac{\Gamma(0,55) \cdot \Gamma(0,45)}{\Gamma(0,05) \cdot \Gamma(0,95)} = \frac{1}{6,3},$$

de sorte que le second a pour l'onde fondamentale une capacité résiduelle déwattée $6,3^2 = 39$ fois plus grande que le premier. Naturellement, comme chaque condensateur possède en outre une capacité instantanée, on ne peut donner aucune indication sur la capacité totale.

B. Conclusion. — Je n'ai développé les calculs précédents que dans deux cas extrêmes. Le premier correspond seul à la réalité industrielle, les courbes fournies par les alternateurs usuels ne présentant jamais de portions verticales et les séries rencontrées dans le calcul étant par suite rapidement convergentes.

Dans les alternateurs industriels, la répartition discontinue des conducteurs induits le long de l'entrefer et la forme des pièces polaires donnent à la courbe de tension une allure plus ou moins polygonale. Son développement en série de Fourier affecte à chaque terme un coefficient qui varie en raison inverse du carré de son rang. Les conclusions sont donc analogues à celles que j'ai obtenues avec le triangle : pour les valeurs usuelles de n , l'erreur que l'on commet en considérant les pertes comme ne dépendant que de la valeur efficace est de l'ordre de 1 pour 100.

Les machines usuelles fournissent également à vide des harmoniques de denture mais ceux-ci sont, en charge, rapidement étouffés par les courants de Foucault et court-circuités par les moteurs asynchrones du réseau d'utilisation ; ils ne semblent donc pas modifier sensiblement la conclusion précédente.

Bien entendu, celle-ci n'est valable que dans les cas usuels ; elle est en défaut par exemple si l'on produit une tension bien rectangulaire avec une pile et un commutateur tournant ou encore si un harmonique de la tension appliquée entre en résonance ; dans ces deux cas, d'ailleurs, l'intensité devient très grande à **certains moments de la période** et la perte dans les armatures est également à considérer.

Ces déductions théoriques sont bien d'accord avec les résultats expérimentaux obtenus au paragraphe VII du chapitre IV.

IV. THÉORIE PHYSIQUE. — Plusieurs théories physiques de la viscosité ont été proposées ; toutes, convenablement modifiées, peuvent satisfaire aux lois mathématiques que j'ai données précédemment ; aussi ne faut-il pas compter sur les résultats quantitatifs pour choisir entre elles.

La cause de la viscosité est évidemment un déplacement de charges électriques, mais cette conductibilité peut être localisée soit dans l'atome, soit dans la molécule, soit dans un ensemble de molécules.

A. Par analogie avec ce qui se passe pour les vibrations lumineuses, on a voulu voir la cause de la viscosité à l'intérieur même de l'atome ; cette hypothèse ne peut que difficilement se soutenir. Il est en effet peu vraisemblable d'imposer la même cause à des effets correspondant à des longueurs d'onde de quelques Angströms pour les uns, de quelques millions de kilomètres pour les autres. Il faudrait imaginer des électrons spéciaux, et encore serait-il difficile d'expliquer leur amortissement énorme.

En outre, alors que pour des fréquences élevées (rayons X et rayons lumineux), l'absorption d'un corps est caractéristique de ses atomes ou de sa molécule, il n'en est rien pour les oscillations électriques ; il est impossible d'attribuer à chaque corps un coefficient de viscosité défini. Les pertes dépendent surtout de la pureté de l'échantillon étudié et proviennent sans aucun doute des impuretés dans le cas général.

A mon avis donc, toutes les absorptions dont le siège est à l'intérieur de l'atome ne peuvent intéresser que des ondes plus courtes que les ondes hertziennes.

B. Mais si un électron peut grouper autour de lui un ou plu-

sieurs atomes, l'ensemble ainsi constitué formera, à l'intérieur de la molécule, un élément de masse notable, susceptible par conséquent de n'entrer en vibration que pour des oscillations relativement lentes ; c'est précisément ce qui a lieu pour la glycérine, l'eau, l'alcool et la plupart des substances dont la molécule contient OH.

L'existence d'ions est mise en évidence ⁽¹⁾ dans ces corps par l'augmentation énorme du pouvoir inducteur K et de l'indice de réfraction $\sqrt{K}$ lorsque l'on passe des oscillations infra-rouges aux oscillations hertziennes. Pour les premières, la fréquence est trop grande pour que le déplacement des ions puisse prendre une amplitude notable et la polarisation qui en résulte est insensible. Pour les oscillations hertziennes de grande longueur d'onde, au contraire, le déplacement des ions suit docilement la variation du champ électrique ; il n'existe aucune différence de phase entre eux et par suite pas d'absorption. Mais, pour une région intermédiaire, celle qui correspond à l'augmentation rapide de K , le déplacement des ions est nettement en retard sur l'intensité du champ et il en résulte des pertes notables ⁽²⁾.

Suivant la nature et la mobilité des ions, la bande intéresse des longueurs d'onde différentes ⁽³⁾ ; elle doit se trouver au-dessous de 1 mm pour l'eau, entre 1 mm et 10 cm pour l'alcool, entre 1 cm et 10 m pour la glycérine, et au-dessus de 20 m pour la glace. J'ai pu la mettre en évidence pour la glycérine aux environs de 5 m. On doit pouvoir en faire autant, à des fré-

(1) Lorsque la dissociation n'a pas lieu (état gazeux ou basse température), le pouvoir inducteur à basse fréquence reste compris entre 2 et 3.

(2) Les équations établies dans la théorie électromagnétique de la lumière s'appliquent ici sans aucune modification puisqu'elles ne supposent rien sur la nature de l'élément polarisé ; elles permettent, en particulier, d'étudier à l'intérieur de la bande d'absorption les variations du pouvoir inducteur et de l'angle de perte.

(3) Valeurs de $K = n^2$ pour différentes longueurs d'onde :

EAU		ALCOOL		GLYCÉRINE		GLACE	
λ_{cm}	K	λ_{cm}	K	λ_{cm}	K	λ_{m}	K
∞	76	∞	26	1 000	56,2	∞	79
35 000	80	200	24,4	200	39,1	2 000	2,5
205	80,6	75	23	75	24,5	14	3,10
3,2	85	5	10,2	8,5	14,1	0,00005	1,72
0,4	90,2	0,4	5	0,4	2,6		
0,00005	1,77	0,00005	1,85	0,00005	2,16		

quences plus élevées pour l'eau et l'alcool ⁽¹⁾; de même pour la glace à des fréquences plus basses, à condition d'opérer sur un échantillon assez pur pour ne pas être gêné par des conductibilités parasites.

C. La cause de la viscosité peut encore être cherchée dans un retard à l'orientation des molécules. Cette explication ne semble pas valable en général, l'orientation des molécules étant un phénomène très rapide (Le phénomène de Kerr disparaît en moins de 10^{-8} seconde) tandis que la viscosité, même pour les liquides, est extrêmement nette pour des fréquences supérieures à 1 000. Pourtant, si l'on considère que le champ électrique produit des déformations mécaniques et que certains corps possèdent une viscosité mécanique notable, on conçoit qu'il puisse en résulter pour des oscillations rapides une perte d'énergie appréciable. Tel pourrait être par exemple le cas du caoutchouc. Il est difficile de se prononcer sur la validité de cette hypothèse, dans l'ignorance où l'on est des lois de la viscosité mécanique pour des fréquences rapides ; j'ai fait toutefois remarquer que la tension mécanique du caoutchouc faisait varier dans de notables proportions son angle de perte.

D. On peut enfin admettre, et cette théorie s'impose à basse fréquence, que la viscosité est due à une conductibilité extramoléculaire. Maxwell qui s'est occupé le premier de la question a montré que si un diélectrique se compose de plusieurs couches dont la conductibilité ne varie pas proportionnellement au pouvoir inducteur, il présente le phénomène de charges résiduelles. Hess a repris cette théorie et, pour la simplifier, a considéré un condensateur réel comme formé par deux condensateurs en série dont l'un shunté par une résistance ⁽²⁾.

Ces conductibilités sont évidemment électrolytiques et l'on est conduit naturellement à considérer les diélectriques à résidus comme hétérogènes : dans le diélectrique pur absolument isolant, sont occluses ou dissoutes des traces de matière électrolytique ; pour la plupart des corps, plus ou moins poreux, ces impuretés sont constituées par de l'humidité, mais il peut en être autre-

(1) Ces phénomènes ont été mis en évidence pour des ondes amorties en particulier par Barbillion (Sur la dispersion électrique, Thèse, Paris-1899).

(2) Cette simplification doit être rejetée ; j'ai montré précédemment que pour obtenir théoriquement des lois vérifiées par l'expérience, il fallait considérer le condensateur réel comme formé d'un grand nombre de condensateurs élémentaires.

ment ; il y a lieu de penser par exemple que dans le verre, le silicate de soude joue le rôle de conducteur ⁽¹⁾ au milieu de silicates doubles parfaitement isolants.

Pour des ondes suffisamment longues, les ions électrolytiques se déplacent sous l'influence du champ, malgré la résistance qu'ils éprouvent de la part des molécules du corps neutre. Certains sont finalement arrêtés et, s'accumulant au fond de cavités plus ou moins volumineuses donnent naissance aux charges résiduelles ; d'autres réussissent à atteindre les armatures et sont la cause des fuites.

Ce qui justifie cette manière de voir, c'est l'étroite dépendance qui unit les fuites et les résidus. Toute cause qui fait varier les uns influe sur les autres ⁽²⁾ : l'humidité augmente, à la fois et dans de grandes proportions, les résidus et les fuites ; lorsqu'un corps devient pâteux sous l'influence d'une élévation de température, les fuites et les résidus augmentent ensemble, puis lorsqu'il fond, les résidus se transforment en fuites ; enfin, l'application soutenue d'une tension constante peut, dans certains condensateurs, éliminer à la fois les fuites et les résidus.

Les lois qui régissent le déplacement des impuretés électrolytiques dépendent essentiellement de la constitution physique du diélectrique : celui-ci peut présenter des poches plus ou moins nettes, reliées par des fissures de dimensions très variables et plus ou moins inclinées sur la direction du champ. Il s'ensuit que les divers circuits ainsi formés ont des constantes de temps très différentes et il est possible, en faisant certaines hypothèses sur la répartition des impuretés, de donner une raison physique aux lois mathématiques précédemment obtenues ⁽³⁾. Il semble prématuré d'entreprendre actuellement cette étude et l'on peut se borner à quelques remarques :

Lorsque les fissures conductrices ont une faible longueur, comme par exemple dans le mica où la présence de plans de cli-

⁽¹⁾ Dans l'électrolyse du verre, le silicate de soude satisfait aux lois quantitatives de Faraday. Les différentes sortes de verres sont d'autant meilleures qu'elles contiennent moins de soude ou de potasse.

⁽²⁾ Au contraire, ces causes sont sans action sensible sur le pouvoir inducteur instantané et sur l'indice de réfraction.

⁽³⁾ Mon exposé mathématique indique que les pertes totales sont proportionnelles à ω^n (viscosité) et à ω^0 (fuites). L'expérience montre que c'est suffisant en première approximation. Il faudrait probablement, pour s'approcher davantage de la réalité, écrire $\sum \omega^n$ en donnant à n plusieurs valeurs différentes ou bien choisir une autre fonction. Mais il paraît inutile de construire une théorie plus approchée tant que, expérimentalement, on ne connaîtra pas mieux les diélectriques.

vage perpendiculaires à la direction du champ est un obstacle à des déplacements importants d'ions, les constantes de temps faibles prédominent, l'exposant n est voisin de 1 et il y a peu de fuites. Quant au contraire, le corps étudié est sensiblement isotrope, comme par exemple le verre, les déplacements d'impuretés peuvent être considérables, n est peu différent de 0 et les fuites sont importantes. Enfin, dans les liquides, il ne peut y avoir de résidus que pour des ondes relativement courtes, les fuites étant largement prépondérantes à basse fréquence.

Lorsque, sous l'action d'une cause quelconque, les propriétés mécaniques du diélectrique se modifient, la résistance au déplacement des ions électrolytiques et par suite les pertes varient. C'est ainsi que peut s'expliquer l'influence de la température : à un échauffement correspond en général une augmentation de la viscosité mécanique ; il en résulte une augmentation des pertes et une diminution de l'exposant n . Chaque cas particulier demande d'ailleurs une étude spéciale, la dissociation des impuretés étant elle-même fonction de la température.

CONCLUSION

En COURANT CONTINU, j'ai montré que le PRINCIPE DE SUPERPOSITION, applicable aux corps cristallisés, n'est pas toujours vérifié pour les diélectriques industriels, en particulier pour le papier imprégné ; il se produit dans certains d'entr'eux, sous l'action prolongée du courant continu, une épuration lente qui fait disparaître à la fois les fuites et les résidus.

J'ai obtenu des CYCLES DE VISCOSITÉ de forme elliptique ; il m'a fallu pour cela employer un montage permettant au balistique d'enregistrer des décharges extrêmement lentes.

En COMPARANT LES DIFFÉRENTES MÉTHODES employées pour déterminer la capacité et les pertes par viscosité, j'ai montré théoriquement et expérimentalement qu'elles ne pouvaient donner de résultats identiques ; j'ai PERFECTIonné certaines d'entre elles, notamment celle du pont pour les petites capacités.

En étudiant l'influence que pouvaient avoir sur les pertes un certain nombre de facteurs, j'ai obtenu les résultats suivants :

Les pertes et la capacité résiduelle sont généralement proportionnelles à une CERTAINE PUISSANCE DE LA FRÉQUENCE.

Pour un corps solide et homogène, les pertes varient, en première approximation, proportionnellement à une certaine puissance de la TEMPÉRATURE. Pour les corps susceptibles de fondre ou de devenir pâteux aux températures étudiées, les lois de variation sont plus complexes.

Lorsque la température reste constante et que le contact entre le diélectrique et les armatures est parfait, l'angle de perte est INDÉPENDANT DE LA TENSION ET DE L'ÉPAISSEUR.

J'ai développé une THÉORIE MATHÉMATIQUE qui s'accorde avec mes résultats expérimentaux.

De l'ensemble de mes expériences, il ressort que les pertes dans les diélectriques sont en général, pour les fréquences usuelles, dues à des impuretés électrolytiques, notamment à l'humidité.

Il me reste pour terminer à remercier tous ceux qui ont bien voulu s'intéresser à mes travaux.

Je prie M. Paul Janet, membre de l'Institut, qui n'a cessé de m'encourager dans mes recherches, d'agréer ici l'hommage de ma profonde gratitude.

La Société française des Electriciens a bien voulu se charger de la publication de ce mémoire : je lui en dois la plus grande reconnaissance, et je suis heureux de lui exprimer mes plus vifs remerciements.

LES PERTES SUPPLÉMENTAIRES DANS LES MACHINES ÉLECTRIQUES

La prédétermination des pertes dans les machines électriques a fait de grands progrès durant les dernières années, mais beaucoup de questions restent encore à élucider. Dans la présente communication, l'auteur passe en revue tous les genres de pertes qui peuvent exister, en insistant tout particulièrement sur celles qui, à l'heure actuelle, sont insuffisamment connues. L'auteur espère que cette communication incitera de nombreux électriciens à étudier les problèmes ainsi posés et que d'autres communications suivront, dans lesquelles les questions effleurées ici seront traitées d'une façon plus approfondie.

M. ROTH. — « La présente communication a deux buts bien distincts ; elle doit, d'abord, indiquer les points qui restent encore obscurs dans le calcul des pertes et, ensuite, elle devrait pouvoir servir de base pour une réglementation de la définition du rendement des machines électriques.

» En ce qui concerne le premier point, de grands progrès ont été faits dans les dernières années, et ce sont surtout les savants français qui se sont distingués dans ces recherches ; en effet, je n'ai qu'à citer les noms de MM. Potier, Picou, Boucherot et Brylinski, qui ont étudié les pertes par courants de Foucault et les ont rendues accessibles au calcul ; MM. Bethenod, Jouaust et Latour, d'autre part, ont donné les moyens de calculer les pertes dans les tôles aux fréquences élevées. Mais, comme j'aurai l'occasion de le montrer, beaucoup de questions restent à élucider et je m'adresse surtout aux électriciens non constructeurs, pour nous aider à résoudre les problèmes délicats qui se posent journellement dans la construction des machines. Celles-ci se sont développées d'une façon considérable dans les dernières années et des phénomènes qui ont passé inaperçus autrefois peuvent devenir d'une gravité exceptionnelle dès qu'il s'agit de machines de grande puissance.

» Quant au deuxième point, il semble qu'il y aurait lieu de tenir compte, dans une plus large mesure, des pertes réelles qui existent dans une machine. En définissant le rendement par les pertes séparées, mesurées à vide, on fait abstraction de certaines pertes existant en charge et qui influent sur la valeur du rendement. Il faut donc savoir les calculer et connaître les moyens de les mesurer.

» Les machines électriques qui ont pris le plus grand développement dans les dernières années sont, en premier lieu, les alternateurs et, ensuite, les transformateurs. Les premiers peuvent être considérés comme type de machines électriques rotatives ; ce que

nous pourrions dire à leur sujet s'applique en grande partie à toutes les machines rotatives ; chaque genre de machine a toutes ses particularités que nous examinerons dans la suite. Nous étudierons donc tout particulièrement les alternateurs.

» Dans toute machine électrique, on distingue les pertes dites constantes et les pertes qui sont fonction de la charge. Nous passerons d'abord en revue les premières, qui se manifestent déjà lors du fonctionnement à vide.

» Parmi les pertes rigoureusement constantes, on peut citer les pertes par ventilation et frottement d'air. Dans les machines à faible vitesse angulaire, elles sont négligeables, mais atteignent des valeurs considérables dans les turbo alternateurs, où elles peuvent devenir de l'ordre des pertes dans le fer. Il faut de grandes quantités d'air pour refroidir ces machines et, pour utiliser cet air d'une façon efficace, il faut lui faire suivre des chemins souvent très compliqués, pour l'amener dans tous les endroits qui peuvent être soumis à des échauffements dangereux, particulièrement près des capotes de l'enroulement de l'induit ; cela nécessite de grandes pressions d'air et entraîne, par conséquent, des pertes relativement élevées. Ces pertes sont inévitables ; tout au plus peut-on, en dimensionnant largement tous les conduits, les réduire à un minimum. Mais il vaut mieux consentir un léger sacrifice sur la valeur du rendement, plutôt que de risquer des échauffements trop élevés par une économie mal comprise.

» La prédétermination des pertes par ventilation est assez difficile, et ne peut, à l'heure actuelle, être entreprise sans de sérieuses investigations expérimentales. Trop de facteurs entrent en jeu et les constructeurs se basent généralement sur des expériences faites sur des machines exécutées. Mais très souvent cela n'est pas suffisant ; je citerai comme exemple le dispositif d'essai que la Société alsacienne de Constructions mécaniques a fait réaliser pour connaître d'avance la pression nécessaire pour faire passer la quantité d'air requise dans les tôles du stator des alternateurs de Gennevilliers.

» Viennent ensuite les pertes par frottements dans les paliers. Elles sont généralement peu élevées et leur prédétermination peut se faire avec assez de précision. Mais, là encore, les études théoriques ne sont pas suffisantes pour tirer au clair tous les points obscurs, et il est difficile de dire quelle est la longueur d'un coussinet qui donne le minimum de pertes avec un maxi-

mun de sécurité. Des travaux très intéressants ont été publiés à ce sujet, parmi lesquels je citerai celui paru dans la « Revue B. B. C. », mais le champ est encore ouvert pour d'autres études, avant que cette question soit entièrement élucidée.

» Les pertes par ventilation et par frottement constituent les pertes mécaniques ; nous en venons maintenant aux pertes magnétiques et électriques à vide.

» On a l'habitude de distinguer les pertes normales et les pertes supplémentaires ou additionnelles. Les premières comprennent les pertes qui sont inévitables dans une machine électrique ; elles doivent, dans une machine bien comprise, correspondre à un minimum, compatible avec le but à atteindre. Les pertes supplémentaires, par contre, sont celles qui pourraient être évitées, plus ou moins, par des dispositions convenables, ou encore celles qui ne peuvent pas être évitées, mais qui échappent au calcul.

» Les pertes normales à vide sont les pertes dans le fer, et on pourrait croire qu'il devrait être possible, depuis le temps que l'on construit des machines électriques, de les calculer avec précision. Il n'en est rien, toutefois ; on calcule d'habitude les pertes en tenant compte des valeurs maxima des inductions réelles existant à chaque endroit, en se basant sur la qualité de tôles admise ; généralement, on admet que les pertes varient avec le carré de l'induction pour une fréquence donnée. La valeur des pertes, obtenue de cette façon, est alors multipliée par un facteur déduit des mesures faites sur des machines analogues, facteur qui peut aller jusqu'à 2,5. Cette incertitude a plusieurs causes : en premier lieu, on se base pour les calculs sur les pertes mesurées sur un échantillon de la tôle employée, lorsqu'il est soumis à un champ alternatif ; or, cela n'est pas conforme aux conditions réelles, du moins en ce qui concerne le corps des tôles de l'induit, où la direction du champ varie constamment ; les molécules du fer sont soumises à l'hystérésis tournante. Les recherches ont prouvé que, dans ces conditions, les pertes par hystérésis sont plus élevées que lorsque le fer est soumis à l'action d'un champ alternatif. Il y a eu beaucoup de controverses à ce sujet, mais la question attend toujours une solution nette, qui permette de calculer d'avance les pertes par hystérésis. D'après certains auteurs, les pertes par hystérésis tournante atteindraient pour de faibles inductions deux fois celles dues à

l'hystérésis alternative, tandis que pour des inductions élevées, les deux pertes auraient la même valeur. En élucidant cette question, un expérimentateur pourrait rendre de grands services à l'industrie.

» Lorsque l'on calcule les pertes dans le fer, on admet toujours que la variation de flux est sinusoïdale ou que la courbe du flux, émis par le pôle, est une sinusoïde. Cela est généralement le cas dans les turboalternateurs, mais n'est pas toujours conforme à la réalité dans les alternateurs à pôles saillants ; la forme sinusoïdale de la courbe de l'intensité du champ n'est d'ailleurs pas toujours une nécessité, car très souvent on dispose d'un nombre suffisant d'encoches par pôle et par phase, pour obtenir une courbe sinusoïdale de la force électromotrice induite. Or, avec une courbe du flux qui s'approche d'un rectangle, les pertes dans le fer sont certainement plus élevées que lorsque cette courbe est une sinusoïde, car l'induction dans les dents change très rapidement de sens. La question posée est donc celle-ci : quel est le rapport des pertes, lorsque la courbe du flux émis par le pôle est, par exemple, un rectangle, à celles qui existent lorsque cette courbe est une sinusoïde : Nous verrons plus loin un problème analogue dans le calcul des pertes supplémentaires, dues à la commutation, dans le cuivre des machines à courant continu. La forme de la courbe du flux se modifie lorsque l'alternateur est chargé ; les pertes dans le fer ne sont donc pas indépendantes de la charge et ne sont pas rigoureusement constantes, et le problème que nous venons de poser a un caractère beaucoup plus général ; il concerne non seulement un rectangle, mais une courbe de flux de forme quelconque.

» Les pertes dont nous venons de parler constituent les pertes normales à vide ; elles sont inévitables, mais il est évident que, par un dimensionnement convenable, elles doivent être réduites à un minimum.

» Les pertes supplémentaires dans le fer sont de différentes sortes. En premier lieu, lorsque les dents, ou encore la couronne de l'induit, sont très saturées, il existe une chute de potentiel magnétique le long de la partie saturée ; cette différence de potentiel existe aussi dans l'espace d'air environnant et est la cause de pertes dans les parties massives avoisinantes ; ces pertes existent, par exemple, dans les dents des distanceurs entre les différents paquets de tôles, ou dans les plateaux de serrage des

tôles. Elles se manifestent par un « effet de coque » et peuvent être évaluées en partant de la formule de M. Boucherot. Nous rencontrerons l'« effet de coque » encore plusieurs fois au cours de cette étude.

» Il existe, d'autre part, un autre genre de pertes, dans le cuivre de l'induit et qui sont dues à la même cause. On sait que le flux théorique correspondant à une dent ne passe pas entièrement dans celle-ci, mais qu'une partie traverse l'espace d'air environnant, particulièrement lorsque les dents sont saturées. On admet, d'après Potier, qu'à une profondeur donnée, l'intensité longitudinale du champ dans l'encoche, est celle qui correspond, à la même profondeur, à l'induction dans la dent. Lorsque les cuivres sont couchés à plat dans l'encoche, cette intensité de champ est dirigée perpendiculairement au plan du cuivre, et provoque dans les conducteurs des courants de Foucault qui sont la cause de pertes supplémentaires. Tout comme les pertes dans le fer, ces pertes ne sont pas entièrement indépendantes de la charge, car elles dépendent de la forme de la courbe du flux. Elles ajoutent à chaque endroit de la section des conducteurs, aux pertes dues à la répartition du courant en charge, des pertes résultant d'une certaine densité fictive de courant. Nous nous servons à la Société alsacienne de Constructions mécaniques d'une formule, établie par M. Belfils, qui permet de calculer cette densité ; M. Belfils doit, du reste, publier cette formule très prochainement. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette question lorsque nous examinerons les pertes supplémentaires en charge dans le cuivre de l'induit.

» On sait que ces pertes peuvent être évitées, ou au moins être réduites à des valeurs très faibles, en employant des barres câblées pour les conducteurs situés près de l'entrefer, ou en subdivisant ceux-ci convenablement.

» Lorsque l'on a relevé expérimentalement les pertes à vide d'un alternateur, en fonction de la tension, on peut, après avoir retranché les pertes constantes dues à la ventilation et au frottement, tracer la courbe des pertes dans le fer. On remarque que ces dernières sont, jusqu'à une certaine valeur de la tension aux bornes, pratiquement proportionnelles au carré de la tension, mais qu'à partir de cette valeur elles croissent beaucoup plus vite que le carré. Cela provient, comme nous venons de le voir, de la saturation dans les tôles, qui est la cause de pertes

dans les parties massives de la machine, ainsi que dans le cuivre de l'induit. Ces pertes ne croissent pas avec le carré de l'induction, mais sensiblement avec le carré de l'intensité du champ. Dans une machine bien conditionnée, la courbe des pertes dans le fer ne doit donc pas s'écarter d'une parabole quadratique jusqu'à la tension normale et même légèrement au-dessus, car en charge, particulièrement pour des facteurs de puissances voisins de l'unité, certaines dents peuvent se trouver plus saturées qu'à vides, du fait de la distorsion du flux.

» J'en viens maintenant à une cause de pertes supplémentaires qui a fait le sujet de nombreuses études ; ce sont les pertes à la surface des pôles dues à la denture de l'induit. Elles peu-

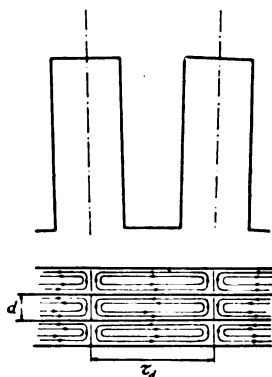


Fig. 1.

vent être évaluées à l'aide de la formule de Potier et les valeurs ainsi obtenues semblent suffisamment d'accord avec les résultats de la pratique. Ces pertes se manifestent particulièrement lorsque l'entrefer est faible et que les dents sont ouvertes ; on sait que l'on peut les éviter en feuilletant les pôles, ou en fermant partiellement les encoches. Adams a calculé les pertes dans le cas d'un inducteur feuilleté ; il admet que les courants se ferment dans le rectangle étroit (fig. 1), formé par la surface périphérique de la tôle sur la longueur d'un pas dentaire, et que les courants circulent dans un sens sur un des côtés du rectangle et dans l'autre sens sur l'autre côté. La grande résistance ohmique offerte de cette façon aux courants explique la faible valeur des pertes. Cette façon de calculer est encore admissible lorsque le rotor, d'un turbo alternateur par exemple,

est constitué par des plaques, mais peut-elle aussi être employée lorsque la surface du pôle ou du rotor est rainurée ? On sait, en effet, que les rainures constituent un moyen efficace de protection contre les courants de Foucault à la surface des pôles, lorsque les encoches ne peuvent pas être fermées. Nous avons eu l'occasion, il y a quelques années, de constater, lors de l'essai à vide d'un turbo alternateur à rotor massif, un échauffement inexplicable du cuivre inducteur ; le rotor, excité au courant normal, a présenté un échauffement de 60°C . Après démontage on a vu que la surface du rotor était bleue à certains endroits ; c'est alors que nous avons eu l'idée de faire tourner des rainures dans la surface du rotor ; elles étaient situées à 5 mm l'une de l'autre et leur profondeur était de quelques millimètres. Un nouvel essai a donné un échauffement de 43°C du cuivre inducteur ; le rotor s'est donc comporté de même que s'il avait été feuilleté. Les courants doivent circuler comme si les parties proéminentes du rotor étaient isolées les unes des autres, quoiqu'elles soient réunies électriquement entre elles. On peut expliquer ce phénomène par le fait que le champ dans l'entrefer n'a pas de composante perpendiculaire aux parois de la rainure et que par conséquent aucun courant n'y circule. Si cette explication est exacte, il doit suffire de briser la coque par une rainure supérieure à son épaisseur ; ce phénomène est un de ceux dont l'étude vaudrait la peine d'être entreprise.

» Mais d'autres pertes se manifestent encore lors du fonctionnement à vide, dont quelques-unes, toutefois, peuvent et doivent être évitées. Les fuites latérales de l'inducteur peuvent occasionner des pertes par courants de Foucault dans les couvre-enroulements, lorsqu'ils sont très rapprochés des pôles, ou lorsque ceux-ci sont très larges. Très souvent on donne aux pôles un épanouissement dans le sens axial, pour maintenir la partie frontale des bobines inductrices ; le flux qui émane de ces parties peut se fermer par les plateaux de serrage, ou par les tôles de l'induit en entrant perpendiculairement au sens des tôles, ce qui est toujours une cause de pertes très élevées.

» Dans les cas où il y a peu d'encoches par pôle, il peut arriver, lorsque le rapport du pas dentaire à la longueur de l'épanouissement polaire est mal choisi, que le pôle et les dents soient soumis à une variation de réluctance ; les variations de flux qui en résultent sont amorties par des courants de Foucault se pro-

duisant dans la masse des pôles, mais ces courants causent des pertes. Le même phénomène peut avoir lieu pour certains rapports du pas dentaire au pas des amortisseurs situés à la surface du pôle. On conçoit, par exemple, que la variation de réluctance est très élevée lorsque le pas des amortisseurs est plus petit que le pas des encoches du stator. Le problème est analogue à celui que l'on rencontre dans les moteurs asynchrones à encoches ouvertes dans le stator. Ces pertes sont accessibles au calcul ; elles sont d'ailleurs à éviter soigneusement.

» Il reste enfin à mentionner les pertes dans les dents de l'induit ainsi que dans le cuivre induit, dues à la denture des rotors des turboalternateurs. Il est possible d'évaluer ces dernières pertes ; elles peuvent du reste être rendues négligeables par des dispositions convenables.

» Les pertes que nous venons de citer sont toutes dues, qu'elles soient évitables ou non, à la conception ou à la disposition même de la machine. Nous devons maintenant indiquer celles qui proviennent d'une mauvaise exécution de la part de l'atelier et qui sont dues aux courts-circuits entre les bords des tôles. Ceux-ci peuvent être provoqués par des bavures ou par le limage, principalement dans les encoches. Ces courts-circuits sont à éviter autant que possible, car ils constituent un grand danger. Les pertes qu'ils occasionnent sont de deux sortes ; en premier lieu, lorsque plusieurs tôles sont en court-circuit entre elles, sur la dent par exemple, la plaque formée de cette façon est soumise à la variation du flux principal. Des courants de Foucault circulent dans cette plaque, et du fait que l'épaisseur de coque est très faible pour le fer, ces parties se comportent comme si elles étaient massives. On peut donc se rendre compte, en admettant un certain pourcentage de tôles court-circuitées, et en tenant compte de l'intensité du champ principal, de la valeur que ces pertes peuvent atteindre. Mais ce calcul est inutile, car les pertes déterminées de cette façon ne constituent qu'une partie des pertes dues aux court-circuits entre tôles. En effet, admettons une plaque court-circuitée sur une dent et une autre sur la circonférence extérieure des tôles intéressées ; ces tôles et les plaques forment une spire en court-circuit qui embrasse une certaine partie du flux dans la couronne ; des courants très intenses vont circuler dans ces spires en court-circuit ; ils peuvent être la cause de pertes très élevées, qu'il est

évidemment impossible d'évaluer par le calcul. Or les clavettes, destinées à fixer les tôles après la carcasse, ne sont généralement pas isolées, de sorte que toute plaque de court-circuit sur les dents peut trouver sa contre-partie sur le bord extérieur des tôles. Les court-circuits sur les bords des tôles sont la cause des points chauds tant redoutés. Il n'est pas nécessaire que les pertes totales, dues à ces court-circuits soient très élevées, pour constituer un danger pour la machine. Elles peuvent être, dans leur ensemble, assez faibles pour ne pas influencer sur la valeur du rendement, et tout de même amener la destruction de la machine, du fait qu'elles sont localisées. Ces pertes peuvent être évitées par un empilage très soigné des tôles et en enlevant entièrement la limaille, lorsque malgré toutes les précautions, le besoin de limer s'est fait sentir. Après l'empilage des tôles, on soumet la machine à l'essai suivant, permettant de déceler les tôles court-circuitées. On entoure le paquet de tôles et la carcasse par un certain nombre de spires ; la bobine formée de cette façon est alimentée à une tension alternative suffisante pour produire dans le corps des tôles un flux de l'ordre de grandeur du flux normal. Les dents court-circuitées se font remarquer par un échauffement rapide, ce qui permet de remédier au défaut.

» Dans le même ordre d'idées entrent les pertes dues au fraisage des joints, ainsi que celles qui sont dues à l'enchevêtrement des tôles. En effet, entre deux segments de tôles, il existe un joint très faible, que l'on a soin de recouvrir par la tôle voisine ; mais il est évident qu'à l'endroit du joint le flux passe en grande partie dans la tôle de recouvrement, perpendiculairement au sens de la tôle. Ces pertes sont inévitables ; elles échappent à tout calcul.

» Mentionnons encore les pertes par effet Joule, dues au courant de fréquence triple, dans les enroulements en triangle, ainsi que celles dans des parties parallèles de l'enroulement, lorsque celles-ci ne sont pas rigoureusement identiques entre elles ou lorsque le circuit magnétique présente des dyssymétries.

» Je ne citerai enfin que pour mémoire les pertes très élevées qu'occasionnent des boulons de serrage, pas ou mal isolés, placés dans le corps même des tôles. Deux boulons en contact avec la masse forment une spire en court-circuit dans laquelle passent des courants énormes qui peuvent être la cause de la destruction de la machine.

» Nous pensons avoir énuméré à peu près toutes les pertes qui peuvent se manifester lors de la marche à vide d'un alternateur. Quelques-unes de ces pertes ne peuvent être calculées et d'autres ne peuvent l'être qu'approximativement. Néanmoins, il est possible de les mesurer, ce qui est plus difficile pour les pertes en charge. Mais la valeur mesurée des pertes lors du fonctionnement à vide ne permet pas de déduire ce qu'elles deviennent en charge, car c'est une approximation grossière d'admettre qu'elles restent constantes ; nous aurons l'occasion plus loin d'examiner cette question.

» Nous en venons maintenant aux pertes en charge. La première qui se présente à l'esprit, et la seule qui puisse être prédéterminée et mesurée d'une façon précise, est la perte par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur. C'est d'ailleurs la seule perte normale et inévitable dans le cuivre ; toutes les autres entrent dans la catégorie des pertes supplémentaires.

» Parmi ces dernières, nous devons mentionner en premier lieu les pertes supplémentaires dans le cuivre de l'induit, dues au champ propre transversal des encoches. Je crois que ce sont elles qui ont été le plus étudiées, et cela est compréhensible, car il faut connaître aussi exactement que possible les pertes qui se produisent à l'intérieur de la capote isolante. En effet, lorsque la chaleur qu'elles développent devient trop élevée, elle détruit la capote et met la vie de la machine en danger. Parmi les auteurs qui se sont occupés des pertes supplémentaires dans les barres massives, il faut citer en premier lieu le nom de A.-B. Field, dont les travaux sont devenus classiques, et auxquels les nombreuses études parues ultérieurement ont très peu ajouté, tout au plus ont-elles facilité la compréhension du phénomène. Rogowski a donné la notion de la hauteur optimum du cuivre, en démontrant qu'à partir d'une certaine dimension il n'était pas seulement inutile, mais nuisible d'ajouter du cuivre.

» Vous savez que l'on se protège par des subdivisions convenables des conducteurs contre les effets des courants de Foucault. On emploie des inversions, en disposant dans le fond d'une encoche des conducteurs qui sont placés dans le haut de la suivante ; lorsque les conducteurs sont subdivisés, il faut avoir soin d'isoler les conducteurs unitaires entre eux tout le long

de la bobine. Très souvent, on emploie des barres câblées, et j'ai moi-même eu l'occasion d'indiquer la manière de calculer les pertes dans ce genre de barres. Mais dans les grandes machines modernes on utilise des barres composées, constituées par des conducteurs unitaires, isolés entre eux, et placés obliquement par rapport à l'axe de l'encoche, de façon à ce que tous occupent des positions identiques par rapport au champ de fuites de l'encoche ; cette composition des barres est très efficace et réduit les pertes supplémentaires à quelques centièmes des pertes ohmiques.

» Je citerai à cette occasion l'étude de M. Punga qui a paru en 1921 dans « *Elektrotechnik und Maschinenbau* », où tous les systèmes de barres composées sont passés en revue, ainsi que le beau travail de M. Lehmann, publié dans la « *Revue générale de l'Electricité* », en juin 1921. M. Lehmann expose une étude complète du phénomène, en indiquant un moyen très original pour éviter les courants de Foucault.

« Des pertes supplémentaires, dues à la même cause, peuvent se manifester dans les parties frontales des enroulements, particulièrement dans les machines à grande réaction d'induit, car l'intensité du champ, due au flux de fuites dans l'air, peut atteindre, dans ce cas, des valeurs très élevées. Ce flux de fuites est encore la cause de pertes dans les plateaux de serrage, ainsi que dans toutes les pièces massives entourant les têtes de bobines, par exemple, dans les couvre-enroulements. Du fait de la disposition compliquée des têtes de bobines, la valeur de l'intensité du champ à un endroit donné ne peut être calculée qu'approximativement, et il est seulement possible d'évaluer très grossièrement les pertes dues aux fuites frontales, dans les têtes de bobines mêmes, et dans les parties massives qui les entourent.

» Toujours dans le cuivre des alternateurs, nous devons encore mentionner les pertes dans les amortisseurs. Ceux-ci ont plusieurs fonctions ; ils doivent d'abord faciliter la marche en parallèle, ensuite ils amortissent les fluctuations du flux et les harmoniques du champ de réaction, qui ne tournent pas synchroniquement avec l'inducteur, et, en particulier, dans les alternateurs monophasés, ils suppriment le champ inverse. Les pertes dans les amortisseurs dans la marche en parallèle sont générale-

ment faibles, et il est possible de les calculer, mais il est difficile d'évaluer celles dues à l'amortissement de la fluctuation du flux et des harmoniques du champ de réaction ; les pertes dans les amortisseurs des alternateurs monophasés méritent une mention spéciale, et nous reviendrons plus loin sur cette question.

» Une dernière perte supplémentaire dans le cuivre a déjà été indiquée lors de l'énumération des pertes à vide ; c'est celle qui est due à la composante longitudinale du champ dans l'encoche ; nous avons déjà dit que ce genre de perte peut être plus élevé en charge qu'à vide, du fait de la distorsion du flux se produisant lorsque l'alternateur fonctionne avec des facteurs de puissance voisins de l'unité, distorsion qui peut provoquer dans les dents des saturations plus élevées en charge qu'à vide.

» La distorsion du flux est de même, comme nous l'avons déjà dit, la cause de pertes plus grandes dans les dents du fait de la saturation plus élevée ; il est possible d'en tenir compte dans les calculs.

» Les flux de fuites de l'induit produisent aussi des pertes dans le fer qui ne sont pas mesurées lors du fonctionnement à vide. Le flux de fuites dans les dents a peu d'influence sur la valeur des pertes, car il passe, en général, perpendiculairement au flux normal des dents. Il se ferme toutefois par les dents qui séparent les enroulements de deux phases différentes : dans celles-ci, il prend le même chemin que le flux normal et peut s'ajouter à celui-ci en augmentant ainsi la saturation ; cela dépend évidemment de la position relative du flux de l'inducteur et du flux de réaction et, par conséquent, du facteur de puissance ; de grands déphasages du courant, en arrière sur la tension, sont à ce point de vue plus favorables que de faibles déphasages. Examinons en effet les figures 2. Les courants circulant dans les encoches sont donnés en grandeur et en phase par le diagramme vectoriel. Les flèches indiquent le sens des flux de fuites dus à chacun de ces courants ; ces flux de fuites se ferment par les dents comprises entre deux phases différentes. Dans le cas de la figure 2a qui correspond à un circuit extérieur purement inductif, ces flux de fuites sont opposés au flux principal et, par suite, diminuent la saturation. Dans le cas de la figure 2b, par contre, qui correspond au fonctionnement de l'alternateur sur

une capacité pure, ces flux de fuites s'ajoutent au flux principal et augmentent la saturation. Dès que celle-ci atteint une certaine valeur dans la première dent, une partie du flux de fuites retourne par la deuxième dent, et ainsi de suite, de sorte que le flux de fuites finit par se répartir sur toutes les dents. Un examen approfondi de la question a démontré que les pertes supplémentaires, dues

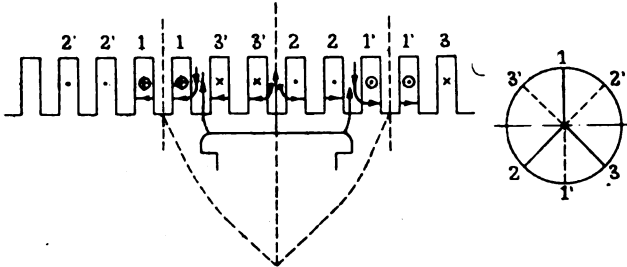


Fig. 2 a

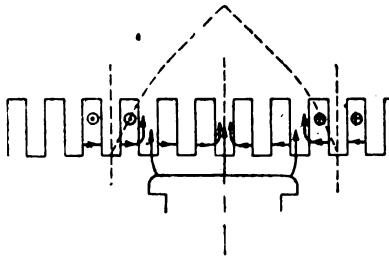


Fig. 2 b

à ce fait, sont peu élevées, même dans des machines à grandes fuites dans les encoches, dans des conditions normales de déphasage ; mais si un alternateur à grandes fuites dans les encoches doit fonctionner avec déphasage en avant, il y a lieu de prendre ce phénomène en considération. Il est possible de tenir compte de cette augmentation de la saturation lors de l'étude de la machine, et les pertes qui en résultent peuvent être évaluées assez exactement.

» En ce qui concerne les fuites des têtes de bobines, on sait qu'un flux supplémentaire dans l'induit doit produire dans l'enroulement la force électromotrice nécessaire pour compenser la chute inductive due à cette partie des fuites ; ce flux passe également par les dents où il augmente la saturation. Toutefois, il

ne s'ajoute pas algébriquement au flux normal, mais est à composer avec lui géométriquement, car il dépend de la valeur du facteur de puissance. On peut encore tenir compte de la chute de tension ohmique, mais celle-ci est généralement négligeable. On sait que la force électromotrice totale de l'alternateur a approximativement la valeur

$$E_t = U + E_r \cos \varphi + E_s \sin \varphi,$$

en désignant respectivement par U , E_r et E_s la tension aux bornes, la chute ohmique et la chute inductive due aux fuites des têtes de bobines. On pourrait donc obtenir une valeur plus exacte des pertes dans le fer en charge, en les prenant égales aux pertes dans le fer à vide, mesurées à la tension E_t au lieu de la tension normale U . Cela paraît équitable, mais la difficulté commence lorsque l'on veut séparer la chute inductive des fuites E_s dues aux têtes de bobines de la chute inductive due aux fuites totales. En réalité, il y aurait encore à tenir compte d'une composante de la force électromotrice de réaction transversale, mais elle est négligeable.

» Les pertes dans le fer dues aux fuites sont inévitables et ne sont pas à ranger parmi les pertes supplémentaires.

» Le fer est encore soumis à un autre genre de pertes ; ce sont celles qui sont dues à la fluctuation du flux. On sait que le champ tournant, tel qu'il est produit en pratique, n'est pas un champ tournant parfait. Du fait de la disposition des enroulements, la courbe représentative de la force magnétomotrice de réaction n'est ni sinusoïdale, ni constante dans sa forme. De ce fait, elle est la cause des champs alternatifs locaux qui produisent des pertes dans les dents de l'induit.

» J'en viens maintenant à un phénomène que nous avons constaté sur les grands alternateurs de Gennevilliers et que j'ai déjà eu l'occasion de mentionner dans les descriptions de ces machines, parues dans la « Revue générale de l'Electricité » et dans le « Bulletin de la Société alsacienne de Constructions mécaniques ».

» Pour l'expliquer, je dois d'abord vous rappeler que, dans ces alternateurs, les encoches possèdent un prolongement, un peu plus étroit que l'encoche normale, et que nous appelons « encoche de fuites » ; ces encoches sont complètement fermées par un petit pont, que nous désignons par « isthme » (fig. 3).

» Mais, d'abord, une remarque s'impose : on pourrait craindre un échauffement de ces isthmes, car ils seaturent ; mais des calculs préliminaires et l'expérience ont prouvé qu'il n'en est rien et qu'ils restent complètement froids. En effet, vu leur faible épaisseur, ils ont une surface considérable par rapport à leur masse et sont, de plus, soumis à l'action directe de la ventilation. Or, lors de l'essai en court-circuit, on a remarqué que les isthmes situés près des extrémités des tôles du stator chauffaient fortement. On y a facilement remédié en coupant les isthmes des paquets extrêmes. On a constaté, de plus, que, dans le fonctionnement en court-circuit, les paquets extrêmes en entier étaient beaucoup plus chauds que ceux situés près du centre et,

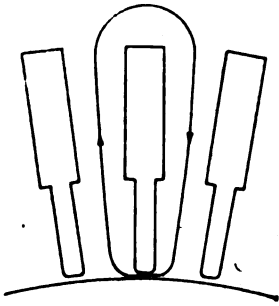


Fig. 3.

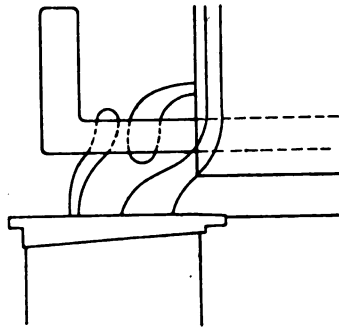


Fig. 4.

fait plus curieux, que cet échauffement supplémentaire disparaissait presque entièrement en charge.

» Ce phénomène a été signalé en 1918, à ma connaissance pour la première fois, par M. Barclay, dans le « Journal of the Institute of electrical Engineers ». Nous nous l'expliquons de la façon suivante : une partie du flux de réaction de l'induit, au lieu de se fermer par l'inducteur, trouve un chemin dans les frettes en acier du rotor (fig. 4). Cette partie du flux de réaction n'est donc pas contre-balancée par le flux de l'inducteur et n'est limitée que par la saturation des paquets extrêmes, car la réluctance due à l'air est relativement faible. Les paquets extrêmes, du fait qu'ils sont très fortement saturés, sont soumis à des pertes et à un échauffement très élevés; en même temps les plateaux de serrage subissent l'action du champ élevé provenant de la grande saturation des tôles avoisinantes, et se mettent également à chauffer. Mais, ce qui rend ce phénomène encore plus grave est

le fait que ce flux parasite, pour entrer dans la frette, traverse les dents presque perpendiculairement au sens des tôles. La composante du champ perpendiculaire au sens des tôles, provoque des courants de Foucault considérables dans les dents. On comprend aussi l'échauffement élevé des isthmes : les dents, en effet, sont reliées entre elles, d'une part par la couronne des tôles et, d'autre part, par les isthmes, et chaque paire de dents forme de ce fait une spire en court-circuit pour la composante du flux parasite qui est perpendiculaire au sens des tôles ; l'isthme coupé, le court-circuit n'existe plus.

» Mais, lorsque la machine fonctionne en charge, vu la prépondérance des ampères-tours inducteurs, les paquets extrêmes supportent déjà le flux normal, qui est en partie antagoniste au flux parasite ; il en diminue la valeur, de sorte que dans ces paquets le flux résultant en charge est bien plus faible qu'en court-circuit.

» Les lignes de force du flux de fuite qui entoure les parties droites des bobines ne sont pas situées dans un plan perpendiculaire à l'axe des conducteurs ; le champ, de par la présence du fer, a également une composante perpendiculaire au sens des tôles, dont l'effet s'ajoute à celle du flux parasite.

» Pour en terminer avec l'énumération des pertes supplémentaires dans les alternateurs, nous devons encore mentionner celles particulières aux alternateurs monophasés. On sait que, dans ceux-ci, l'action du champ inverse est particulièrement néfaste, car il induit dans le système inducteur des courants de fréquence double de la fréquence normale de la machine, et ces courants sont la cause de pertes très élevées. De leur côté, ils induisent un champ et des courants de fréquence triple dans l'induit, qui produisent également des pertes. Un bon amortissement réduit les pertes dues au champ inverse à un minimum. L'inducteur serait exempt de courants de fréquence double si les amortisseurs étaient sans fuites, ce qui n'est jamais le cas ; même dans des machines bien amorties, on peut observer le courant de fréquence double qui se superpose au courant d'excitation. Un alternateur monophasé bien amorti peut atteindre un rendement qui est à peu de choses près égal au rendement de l'alternateur polyphasé de même puissance.

» Les pertes dans un alternateur monophasé non amorti ne

peuvent pas être évaluées, ou seulement très approximativement ; par contre, les pertes dans les amortisseurs, dues à l'annulation du champ inverse, peuvent être calculées assez exactement, même en tenant compte du fait que, pour les alternateurs à pôles saillants, les barres de l'amortisseur ne sont pas uniformément réparties sur la surface du rotor. Dans un alternateur bien amorti, les pertes dans les amortisseurs sont les seules à ajouter aux autres pertes, telles qu'elles existeraient dans un alternateur polyphasé.

» Une question se pose : peut-on reconnaître si un alternateur monophasé est suffisamment amorti ? Ce moyen existe, en effet, et c'est l'essai en court-circuit qui peut nous éclairer à ce sujet. Nous avons eu l'occasion d'examiner un alternateur, d'abord faiblement amorti, et ensuite muni de puissants amortisseurs. Les observations faites sur cette machine nous ont permis de déduire le critérium suivant pour juger de l'efficacité des amortisseurs.

» Prenons, pour plus de simplicité, un alternateur monophasé bipolaire, plaçons dans l'entrefer deux spires, dont les plans sont perpendiculaires l'un à l'autre et faisons coïncider le plan de l'une des spires s_1 avec l'axe de l'enroulement de l'induit ; le plan de l'autre spire s_2 est alors perpendiculaire à cet axe (fig. 5).

» Connectons les extrémités de chacune des spires à l'équipage d'un oscillographe et soumettons l'alternateur à l'essai en court-circuit.

» Supposons d'abord que le champ inverse soit entièrement détruit, ce qui, nous l'avons vu, n'est jamais réalisé entièrement. L'alternateur en court-circuit se comporte alors comme un alternateur polyphasé, et les courbes de l'intensité du champ, relevées par les deux spires, doivent être identiques et doivent avoir la forme de celles que l'on relève sur les alternateurs polyphasés.

» Admettons maintenant que le champ inverse subsiste en entier ; le champ dû à l'enroulement induit est purement alternatif et ne peut avoir aucune influence sur la spire s_1 , dont le plan coïncide avec l'axe de l'enroulement induit. La courbe de l'intensité du champ donnée par cette spire est donc celle du flux de l'inducteur. La spire s_2 , qui est coaxiale avec l'enroulement de l'induit, est soumise à l'action combinée du champ

alternatif et du champ inducteur. Les courbes de l'intensité du champ des deux spires sont donc dans ce cas de formes tout à fait différentes.

» Nous pouvons tirer de ce qui précède la conclusion suivante : lorsque les formes des courbes de l'intensité du champ, relevées sur les deux spires lors du fonctionnement en court-circuit, sont très différentes, et que l'une montre sensiblement la forme de la courbe de l'intensité du champ de l'inducteur, l'alternateur est insuffisamment amorti. Lorsque, par contre, les formes des courbes relevées sur les deux spires sont à peu près les mêmes, et affectent sensiblement celles que l'on constate sur un alternateur polyphasé en court-circuit, la machine est très bien

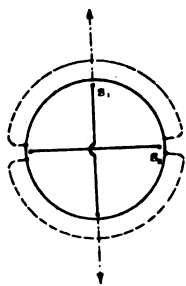


Fig. 5.

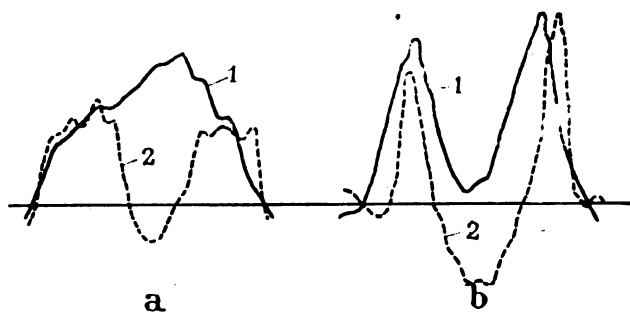


Fig. 6.

amortie. Nous illustrons ce que nous venons de dire par l'exemple de l'alternateur dont nous avons parlé plus haut.

» La figure 6a représente les courbes de l'intensité du champ en court-circuit dans l'alternateur insuffisamment amorti ; la figure 6b celles de l'alternateur bien amorti ; les courbes 1 et 2 se rapportent respectivement aux spires 1 et 2.

» Vous remarquerez d'abord la grande différence de forme entre les courbes 1 et 2 de la figure 6a, et, ensuite, vous voyez que la courbe 1 affecte la forme de la courbe de flux inducteur. Les courbes 1 et 2 de la figure 6b, par contre, sont du même genre, et ont la forme des courbes que l'on relève en court-circuit sur les alternateurs polyphasés.

» Après avoir étudié toutes les pertes qui peuvent se présenter dans un alternateur, nous devons nous demander comment on peut les mesurer. Cette question a été examinée lors de l'étude

préliminaire du Projet des Règles complémentaires d'unification concernant les machines électriques, qui est actuellement soumis à la sixième commission de l'Union des Syndicats de l'Electricité. Ce projet dit ce qui suit au paragraphe 323, au sujet des pertes supplémentaires dans les machines synchrones :

» 1° On mesurera la puissance absorbée par la machine, rotor enlevé, les enroulements du stator étant parcourus par le courant normal à la fréquence de régime.

» La puissance mesurée, déduction faite des pertes par effet Joule, représente les pertes supplémentaires.

» 2° On mesurera la puissance absorbée par la machine entraînée à sa vitesse normale par un moteur indépendant dont on connaît assez bien les caractéristiques pour pouvoir fixer la puissance absorbée par la machine à essayer, lorsqu'on applique l'excitation nécessaire pour obtenir dans l'enroulement de l'induit fermé en court-circuit sur lui-même un courant de circulation égal au courant du régime envisagé. La puissance mesurée, déduction faite des pertes par effet Joule et des pertes par frottement dans les paliers et par ventilation, représente les pertes supplémentaires.

» Par convention, on admettra provisoirement que les pertes supplémentaires dans les machines monophasées sont mesurées par l'essai en court-circuit, indiqué en second lieu pour les machines polyphasées. (1)

» La deuxième prescription a été admise dans les règles américaines, mais uniquement pour les alternateurs polyphasés. En ce qui concerne les alternateurs monophasés, ces règles formulent une réserve, tout comme les règles françaises ; elles font, en effet, remarquer que cette question n'est pas suffisamment élucidée pour pouvoir être réglementée.

» Avant l'introduction de ce paragraphe dans le Projet des Règles complémentaires, la Société alsacienne de Constructions mécaniques a entrepris toute une série d'essais, pour nous permettre de nous rendre compte si les pertes en court-circuit étaient réellement équivalentes aux pertes supplémentaires réelles. Il semble, à priori, que cela doit être le cas, du moins en ce qui concerne les pertes dues au courant induit, car les courbes des cou-

(1) En vue d'établir les règles définitives, l'étude de la détermination plus exacte de ces pertes est poursuivie.

rants relevés en court-circuit s'écartent généralement peu de la sinusoïde. Mais, d'autre part, il est évident que, du fait des harmoniques de la courbe de flux, des pertes existent en court-circuit qui ne se produisent pas lors du fonctionnement normal.

» Ces essais ont porté sur quatre machines, mono et polyphasées, les dernières étant aussi soumises à des essais de fonctionnement en monophasé. Ces génératrices étaient les suivantes :

» Un alternateur monophasé de 2 800 kv-A, 16,2/3 p.s et un alternateur également monophasé de 2 500 kv-A, 50 p.s. Sur ces deux machines, des essais comparatifs, avec et sans amortissement, ont pu être entrepris. De plus, ont été examinés un alternateur triphasé de 2 800 kv-A et un autre de 80 kv-A, tous les deux à 50 p.s.

» La méthode d'essai est la suivante :

» On mesure d'abord les pertes en court-circuit, au moyen d'un moteur taré comme le prescrit le Projet des Règles complémentaires. Quant à la détermination des pertes supplémentaires réelles, il faut faire fonctionner les génératrices à un régime qui permette, d'une part, de mesurer ces pertes, et qui, d'autre part, se rapproche autant que possible de celui du fonctionnement normal. Ce régime est la marche à vide en moteur synchrone surexcité ou sousexcité; on règle l'excitation à une valeur telle que l'alternateur absorbe le courant normal, mais il vaut encore mieux faire les lectures pour différentes valeurs du courant. Le wattmètre indique les pertes totales, et on peut facilement trouver la valeur des pertes supplémentaires, en retranchant les pertes constantes, mesurées à vide, ainsi que les pertes par effet Joule.

» Cette méthode n'est toutefois pas exempte de critique, car la forme de la courbe de flux n'est pas la même à un régime où les flux de réaction sont en phase, ou directement opposés au flux de l'inducteur, que celle qui correspond au fonctionnement à un facteur de puissance voisin de l'unité ; le régime en moteur synchrone surexcité doit, à ce point de vue, être jugé préférable.

» Nous avons essayé de nous rendre compte de l'influence du facteur de puissance sur les pertes. Dans ce but, l'alternateur de 80 kv-A a été soumis à plusieurs essais d'échauffement, en fonctionnement monophasé au courant normal, à deux tensions différentes, l'une supérieure et l'autre inférieure à la tension normale, en moteur synchrone à vide sousexcité et surexcité, et finalement en charge, à deux facteurs de puissance différents, 1 et 0,8.

Nous avons pensé qu'en mesurant les échauffements, il devait être possible de se rendre compte de l'importance de la variation des pertes d'un régime à l'autre. Malheureusement, il faut compter avec le fait que l'excitation est très variable pour les différents régimes, et que la température de l'air, soufflé par le rotor sur l'induit, n'est pas constante. On constate, en effet, que l'échauffement des différentes parties croît en fonction des pertes dans l'inducteur.

» L'échauffement est donc le plus faible pour le moteur sous-excité, un peu plus élevé pour le fonctionnement à des facteurs de puissance voisins de l'unité, et atteint sa plus grande valeur lors du fonctionnement en moteur surexcité.

» Mais un autre essai, fait parallèlement à l'essai précédent, a permis de tirer une conclusion de ce dernier. On a mesuré les pertes supplémentaires, à vide, en régime sous-excité et surexcité, à deux tensions différentes, dont une de 20 pour 100 supérieure à la tension normale, et on a trouvé que les pertes étaient très peu différentes dans les deux cas, légèrement plus élevées dans le cas du moteur surexcité.

» Nous constatons donc, d'une part, que l'échauffement des différentes parties de la machine est, pour des facteurs de puissance voisins de l'unité, compris entre l'échauffement en fonctionnement sous-excité et surexcité ; d'autre part, nous venons de voir que les pertes lors de ces deux régimes sont très peu différentes. On peut donc en conclure que les pertes à d'autres régimes sont peu différentes de celles que l'on mesure en moteur synchrone sur-excité ou sous-excité. La méthode d'essai indiquée plus haut paraît donc justifiée.

» Nous ne pouvons donner ici le détail des essais qui ont été entrepris sur ces différentes machines. Ils ont été consignés, en partie, dans les comptes-rendus du Comité technique de la Chambre syndicale des Constructeurs de gros Matériel électrique ; je pense avoir l'occasion de les publier.

» Le résultat de ces essais a été assez net ; pour les machines examinées, les pertes mesurées en court-circuit, déduction faite des pertes constantes et des pertes par effet Joule, ont sensiblement les mêmes valeurs que les pertes supplémentaires réelles, aussi bien en polyphasé qu'en monophasé, amorti et non amorti. Mais nous disons bien : pour les machines examinées, car, à notre avis, il n'est pas permis de conclure des essais faits sur qua-

tre machines, construites par la même maison, à la généralité des alternateurs.

» Un fait nouveau a d'ailleurs montré qu'il faut être prudent dans ces généralisations. La Société alsacienne de Constructions mécaniques a entrepris de nombreux essais sur les alternateurs de 40 000 kw de Gennevilliers, essais dont j'ai rendu compte dans la « Revue générale de l'Electricité » et dans le « Bulletin de la Société alsacienne de Constructions mécaniques ». La plupart de ces essais ont été entrepris pour mesurer la valeur exacte des pertes. On comprend facilement que dans ces machines, du fait des grands échauffements constatés en court-circuit, les pertes doivent être beaucoup plus élevées en court-circuit qu'en marche normale.

» La détermination des pertes a été faite, sauf dans un seul cas, par la mesure de l'échauffement de l'air de ventilation de l'alternateur. On a d'abord fait tourner la machine à vide, non excitée, ce qui a permis de calculer les pertes dues à la ventilation et au frottement de l'air. Dans un autre essai, la machine excitée a donné les pertes dans le fer. L'échauffement de l'air en charge a alors permis de fixer directement la valeur du rendement, ainsi que celle des pertes supplémentaires, par différence avec les pertes déterminées par les premiers essais et avec les pertes ohmiques dans le cuivre de l'inducteur et de l'induit. Les pertes supplémentaires, déterminées par cette méthode différentielle, sont très faibles ; elles sont, pour le courant normal, de l'ordre de 90 à 100 kw. Mais, lors de l'essai en court-circuit, les pertes supplémentaires, mesurées également par l'échauffement de l'air, ont été de 160 kw, soit cinq fois plus élevées.

» Un troisième essai, qui est également préconisé par le Projet des Règles complémentaires, a été effectué en alimentant par l'un des alternateurs l'enroulement de l'un des autres, dont le rotor était enlevé. Cet essai a donné une valeur de 180 kw pour les pertes supplémentaires. Il se rapproche donc beaucoup plus de la réalité que l'essai en court-circuit.

» La question de savoir si la mesure des pertes supplémentaires par l'essai en court-circuit est admissible, est donc loin d'être tranchée. Il est probablement permis de l'employer pour les alternateurs à pôles saillants jusqu'à une certaine puissance, mais, pour l'instant, il est impossible de dire où est la limite ; pour les turboalternateurs, toutefois, cette méthode paraît inapplicable.

» Je vous ai entretenu de la mesure du rendement par mesure de l'échauffement de l'air. Cette méthode est très bonne, mais il faut l'employer avec beaucoup de précautions. Je renvoie à ce sujet à une étude parue dans la « Revue B. B. C. », en 1919, ainsi qu'à celles de M. Barclay, dans le « Journal of the Institute of electrical Engineers », parue en 1919, et de M. Dawson, dans la « General Electric Review », parue en 1920. Cette méthode ne peut, d'ailleurs, être employée que pour les machines fermées et ventilées.

» Pour les machines normales, il faut une méthode simple, applicable à l'atelier; or, la mesure des pertes par l'essai en court-circuit fait, en effet, partie des essais normaux, de sorte que cette méthode ne constitue ni une complication, ni une perte de temps.

» Il y a très peu à dire des pertes supplémentaires dans les autres machines électriques, où elles ne jouent, du reste, pas le même rôle que dans les alternateurs, car les pertes supplémentaires deviennent d'autant plus dangereuses que la puissance des machines est élevée.

» On construit, il est vrai, des moteurs à courant continu jusqu'à 20 000 kw, mais leur vitesse angulaire est faible et les pertes supplémentaires y sont peu sensibles.

» Pour les machines à courant continu, certaines remarques, faites au sujet des alternateurs, sont encore valables, telles que celles concernant les pertes dans le fer de l'induit, les pertes dans les pièces polaires, les pertes dues aux fuites de l'inducteur. Mais certaines pertes sont spéciales aux machines à courant continu, ce sont celles dues à la commutation.

» M. Picou a étudié les pertes supplémentaires dans le fer des dents, dues à la commutation, et a indiqué les moyens de les calculer. Il y a encore à mentionner celles dans le cuivre de l'induit, qui, comme celui des alternateurs, est parcouru par un courant alternatif dont la forme, en fonction du temps, n'est toutefois pas une sinusoïde, mais un rectangle (fig. 7) et les formules connues pour un courant sinusoïdal ne sont pas valables dans ce cas. Certains auteurs ont cru pouvoir se servir de ces formules, en décomposant le rectangle en harmoniques, et en calculant la somme des pertes dues à ces harmoniques. Mais cette manière de procéder est inadmissible et M. Pohl a attaqué le problème d'une autre façon. Il pose, en principe, qu'il n'y a plus de pertes supplémentaires, dès que le courant est établi, et qu'elles n'existent que

pendant la période de commutation. Il admet une variation sinusoïdale du courant pendant cette période et applique les formules du courant sinusoïdal, en prenant comme valeur de la fréquence celle qui correspond à la durée de la commutation. Cette méthode se rapproche plus de la réalité que la précédente ; mais, comme l'a justement fait remarquer M. Belfils, elle admet un régime établi du courant, ainsi que du champ variable qui en résulte, ce qui n'est pas conforme à la réalité. Le champ avant la commutation est celui qui existe dans une encoche parcourue par un courant continu, et ne peut devenir conforme à la répartition du courant en régime alternatif qu'après un certain laps de temps, très court, il est vrai. Une théorie exacte doit toutefois tenir compte de ce régime transitoire.

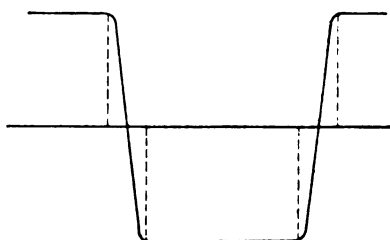


Fig. 7.

» C'est un problème très intéressant, et j'espère qu'il se trouvera une personnalité compétente pour le résoudre.

» Les pertes dans les commutatrices ne sont pas bien différentes de celles que l'on rencontre dans les machines à courant continu; elles ont été étudiées depuis de longues années, mais on pourrait encore examiner les pertes supplémentaires dues aux champs produits par les courants résiduels.

» Les pertes supplémentaires dans les moteurs asynchrones proviennent de l'ouverture des encoches. Elles sont de deux sortes et comprennent des pertes par courants de Foucault et des pertes par variation de réluctance. Ces pertes ont été étudiées par Bragstadt et Fraenckel, qui ont aussi donné des formules permettant de les calculer.

» Nous en venons, en dernier lieu, aux transformateurs. On sait que les pertes les plus dangereuses pour ces appareils, dès

qu'ils sont de grandes dimensions, sont les pertes supplémentaires dans le fer. Elles proviennent des contacts entre les bords des tôles, ou de boulons mal isolés. Dans les transformateurs, il faut tenir compte des pertes supplémentaires dans le fer, dues à des changements de section des circuits magnétiques, ainsi que de celles dans les tôles de serrage. Dans certains cas, il y a lieu de considérer les pertes dans les parties massives dues au troisième harmonique.

» On sait que l'on peut avoir des pertes supplémentaires dans le cuivre, lorsque l'on met en parallèle des circuits qui n'embrassent pas le même champ de fuites, ou lorsque l'on emploie des conducteurs trop hauts. On connaît les moyens de parer à ces inconvénients. Ces pertes sont de la même espèce que celles dues au champ propre des encoches dans le cuivre induit des alternateurs, et elles sont soumises aux mêmes lois. En collaboration avec M. Belfils, j'ai pu établir une série de formules pour les différents cas de la pratique. Nous avons pu en contrôler l'exactitude et espérons pouvoir les publier prochainement.

» CONCLUSION. — Je m'excuse de m'être étendu si longuement sur ce sujet, mais il me semble que la question est d'un intérêt primordial, dans l'état actuel du développement des machines électriques. Ce sont les pertes qui limitent les puissances des machines, et si l'on veut construire économiquement des machines de grande puissance, il faut connaître les causes de pertes, et il faut savoir les calculer et les mesurer. Nous avons déjà dit que l'étude des phénomènes provoquant des pertes a fait de grands progrès, mais nous avons fait voir que beaucoup de problèmes attendent encore leur solution. J'espère que les indications que j'ai données à ce sujet inciteront quelques électriciens à étudier ces problèmes, et que cette communication sera suivie de beaucoup d'autres qui approfondiront certaines des questions mieux que je n'ai pu le faire. »

LES PHÉNOMÈNES DE SURTENSION DANS L'ÉLECTROLYSE ET LES COLLOÏDES ⁽¹⁾

Dans cette communication, les auteurs rappellent les recherches systématiques auxquelles ils se sont livrés depuis 1908 pour expliquer le mécanisme suivant lequel les colloïdes interviennent dans les phénomènes électrochimiques. Depuis fort longtemps, on a remarqué, d'une part, que l'addition de gélatine, de gomme gutte, etc., aux bains d'électrolyse, a la propriété de donner des dépôts d'une structure fine et, d'autre part, que ces mêmes dépôts de qualité supérieure apparaissent dans le cas d'une surtension de la différence de potentiel, « cathode-solution » ; MM. Marie et Audibert se sont donc proposé de vérifier si l'addition des colloïdes ne provoquait pas, également, ce phénomène de surtension. Les expériences relatées ci-dessous ont confirmé ces prévisions, mais sans qu'il soit possible d'en tirer, dès maintenant, des conclusions bien nettes sur les conditions dans lesquelles se manifeste la surtension.

M. MARIE. — « INTRODUCTION. — Depuis fort longtemps déjà, on utilise dans la technique électrochimique, pour améliorer la qualité des dépôts métalliques, des substances dont le rôle nettement favorable a été jusqu'à présent assez mal expliqué. Dès l'origine de la galvanoplastie et de la galvanostégie, les artisans remarquèrent que l'addition aux bains d'électrolyse de substances telles que la gomme gutte, la gomme arabique, la gélatine, le caoutchouc, le jus de réglisse, même à doses extrêmement faibles, amélioreraient considérablement la qualité du dépôt en favorisant la formation d'une structure fine. On sait aujourd'hui que toutes les substances qui possèdent cette propriété sont des colloïdes organiques. Des expériences récentes permettent, du reste, de penser que les colloïdes organiques ne sont pas les seuls à exercer une action. Il semble que les colloïdes minéraux puissent agir de même, l'alumine, en particulier, paraît se comporter de la même manière.

» Cette influence des substances colloïdales n'a encore fait l'objet d'aucune explication sérieuse. Les phénomènes cathodiques qui accompagnent le dépôt d'un métal sur une électrode sont, en effet, fort complexes ; il semble incontestable que la formation des dépôts métalliques relève d'un processus de cristallisation. C'est toujours, en effet, sous forme de cristaux, que le métal apparaît sur la cathode. La grosseur des cristaux est, évidemment, liée aux phénomènes suivants : d'une part, la formation des germes ou noyaux de cristallisation, d'autre part le développement du cristal formé ; si la vitesse de formation des germes est supérieure à celle de grossissement des métaux, c'est un dépôt à structure fine qui apparaît ; dans le cas contraire, c'est évidemment un dépôt à gros grains qui doit se former. Si

(1) Communication faite à la séance du mercredi 11 avril 1923.

L'on adopte cette manière de voir, on constate facilement que tout facteur diminuant la vitesse de développement des faces cristallines doit favoriser la formation d'une structure fine. On a été ainsi amené à penser que les colloïdes organiques dont nous avons donné l'énumération, devaient diminuer cette vitesse en augmentant la viscosité de la région immédiatement contiguë aux cristaux. Il se peut que ces substances agissent de cette manière, mais cette explication est insuffisante, si l'on songe que ces corps, employés à des concentrations très faibles, exercent une influence notable ; c'est ainsi que la gélatine commence à exercer une action sensible sur le dépôt pour des concentrations inférieures à 0,1 pour 100.

» Les expériences que nous allons rappeler peuvent conduire à un schéma d'explication, les conclusions qui en seront tirées n'auront aucun caractère définitif ; elles se présentent comme incomplètes, mais elles réalisent cependant un progrès sur les explications qui ont été présentées jusqu'à ce jour.

» En fait, ces expériences vont nous montrer que les colloïdes agissent sur la différence de potentiel *électrode-solution*. Elles l'élèvent, comme on le verra. Or, on sait que les dépôts à fine structure sont toujours accompagnés d'une polarisation cathodique élevée ; ce fait semble tout à fait général. En d'autres termes, c'est toujours dans les conditions qui assurent à la différence de potentiel *électrode-solution* ses valeurs les plus élevées, que se produisent les dépôts à grains fins. Ce résultat est, du reste, tout à fait logique. Un raisonnement simple montre, en effet, que le nombre de germes dans ce cas est accru. Il n'est donc plus étonnant de constater que les colloïdes qui élèvent les tensions de décharge exercent, par le fait même, une action favorable à la formation de petits cristaux.

» L'exposé des expériences relatives à l'action des colloïdes nécessite un rappel rapide des conditions bien connues dans lesquelles l'électrolyse s'effectue.

LA DÉCOMPOSITION ÉLECTROLYTIQUE. — Lorsqu'on soumet un électrolyte quelconque dans lequel plongent deux électrodes de platine à des différences de potentiel croissantes, on n'observe de courant appréciable (c'est-à-dire de décomposition électrolytique valable) qu'au-dessus d'une certaine valeur de la tension aux bornes, à laquelle on donne le nom de *tension minimum de décomposition* ; on la détermine en construisant la courbe représentant

la variation de tension en fonction de l'intensité de courant ; cette dernière présente un point anguleux qui correspond à la tension cherchée (fig.1). L'existence de ce point anguleux met nettement en évidence la nécessité d'une dépense minimum d'énergie pour produire l'électrolyse. Comme elle intéresse également la cathode et l'anode, on est conduit à écrire en appelant e_0 , la tension minimum de décomposition

$$e_0 = e_a + e_c.$$

e_a , représentant la tension minimum anodique;

e_c , représentant la tension minimum cathodique.

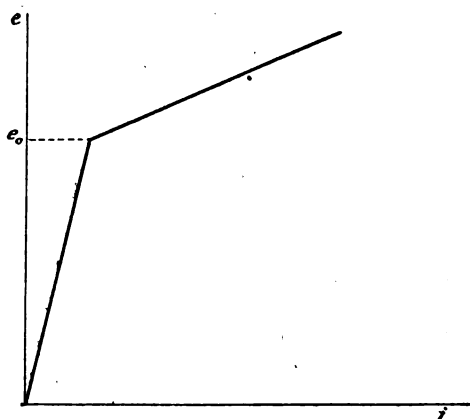


Fig. 1.

» On vérifie, du reste, qu'il existe effectivement des tensions cathodiques et anodiques au-dessous desquelles les transformations électrochimiques dont les électrodes sont le siège ne se produisent point.

» Pour le mettre en évidence, il suffit de déterminer, par rapport à une électrode au calomel, par exemple, le potentiel de chaque électrode pour des intensités variables. On construit ainsi des courbes de tension — courants cathodiques et anodiques — qui présentent des points anguleux correspondant aux tensions nécessaires pour obtenir la décharge des cations et celle des anions sur les électrodes ; on vérifie ainsi la relation :

$$e_0 = e_a + e_c.$$

» On peut donc affirmer qu'il existe, pour chaque ion, une tension électrolytique qui est la force électromotrice minimum néces-

saire pour libérer en quantités appréciables les produits de décharge de cet ion sur une électrode indifférente.

» La théorie de Nernst, qui constitue un guide très précieux dans les raisonnements électrochimiques, permet de comprendre l'existence de ce minimum. Si nous représentons, en effet, par P , la tension de dissolution de l'ion; par p , la pression osmotique des ions dans le liquide, pour décharger sur une cathode un ion de la solution, il faudra que les forces électrostatiques dues au champ électrique, ajoutées à la pression osmotique des ions dans le liquide, soient plus grandes que la tension de dissolution P , dont l'action est antagoniste. C'est-à-dire que :

$$e > \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{P}{p},$$

$\frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{P}{p}$ représente donc la tension au-dessous de laquelle l'électrolyte n'est pas sensible à l'action de décomposition du courant.

» Il en résulte que si on appelle P_a , P_c les tensions de dissolution de l'anion et du cation; par p_a et p_c , leur pression osmotique dans le liquide, la force électromotrice de décomposition de l'électrolyte se compose de deux termes indépendants :

$$e_0 = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{P_a}{p_a} + \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{P_c}{p_c}.$$

» Inversement, si on plonge une électrode métallique dans une solution d'un de ses sels, il existe entre le métal et le liquide une différence de potentiel dont le sens dépend de la tendance qu'éprouve l'électrode à se dissoudre dans le liquide.

» Les métaux à faible tension de dissolution, platine, or, argent, mercure, cuivre, doivent prendre une charge positive, tandis que le liquide devient négatif ; dans ce cas, en effet, la pression osmotique des ions étant bien supérieure à leur tension de dissolution, il existe une couche d'ions qui se dépose sur l'électrode en lui communiquant une charge positive.

» Au contraire, les métaux à forte tension de dissolution, fer, cadmium, zinc, doivent prendre une charge négative ; sous l'action de la tension de dissolution, le métal envoie des ions dans le liquide, et par suite se charge négativement, tandis que le liquide devient positif. Dans les deux cas, un équilibre s'établit sous l'action des différents facteurs d'action : forces électrostatiques

ques, force osmotique et force de dissolution, qui peut être représenté par la formule de Nernst :

$$e = \frac{RT}{F} \text{Log. } \frac{P}{p}$$

dans laquelle les lettres ont leur signification habituelle et où e représente la différence de potentiel entre le métal et le liquide.

» En prenant pour les différents éléments des liquides de même concentration, on obtient des différences de potentiel qui sont comparables. Par exemple, pour des concentrations normales (1 molécule-gramme par litre), on obtient la série des potentiels suivants (en volts) :

K	+ 2,92	Ca	+ 2,28	Cd	+ 0,143	H	= - 0,277	F	+ 2,24
Na	+ 2,54	Mg	+ 1,21	Fe	+ 0,063	Cu	= - 0,606	Cl	+ 1,630
Ba	- 2,54	Al	+ 1,00	Th	+ 0,045	Hg	= - 1,027	Br	+ 1,270
Sr	+ 2,49	Mn	+ 0,798	Co	- 0,045	Ag	= - 1,048	I	+ 0,797
		Zn	+ 0,493	Ni	- 0,049	Pd	< - 1,068	O	+ 1,39 (?)
				Pb	- 0,129	Pt	< - 1,140		
						Au	< - 1,856		

» En comparant ces valeurs à la série des tensions minima de décharge des ions, on voit que, pour la plupart des cas, quand les conditions de concentration sont les mêmes, les indications de ces deux tableaux sont extrêmement peu différentes ; en d'autres termes, la tension de décharge pour de nombreux ions se confond sensiblement avec le potentiel que donne, au contact du même électrolyte, l'élément ion considéré, pris à l'état neutre.

» Pour le zinc, le cadmium, le plomb, le cuivre, l'argent, le mercure, on a par exemple (en volt) :

	Tension de décharge	Potentiel de l'électrode
Zinc.....	+ 0,504	+ 0,493
Cd.....	- 0,142	- 0,143
Pb.....	- 0,125	- 0,129
Hg.....	- 1,027	- 1,027
Ag.....	- 1,048	- 1,048
Cu.....	- 0,606	- 0,606

» On peut donc admettre que la réversibilité de la décharge cathodique des métaux lourds paraît générale. Il existe, il est vrai, quelques exceptions qui sont liées soit à des altérations chimiques de l'électrode, soit à des modifications superficielles, soit encore à des transformations électrochimiques de l'ion, comme

cela doit être le cas des ions ferreux dont on sait qu'ils n'apparaissent sur la cathode que pour une tension nettement supérieure à la valeur donnée par la réversibilité.

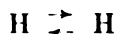
» *Quand il n'y a pas réversibilité, on donne le nom de surtension à l'excès que présente la tension de décharge sur la force électromotrice de l'élément réversible considéré.* D'après ce que nous venons de voir, nous pouvons donc admettre que les surtensions des cations métalliques sont, pour la plupart d'entre eux, nulles ou négligeables. Il n'en est pas du tout de même quand on étudie la décharge d'ions gazeux, en particulier celle de l'hydrogène et de l'oxygène.

» **ELECTRODES A GAZ.** — On sait depuis fort longtemps que deux électrodes de platine platiné, l'une saturée d'hydrogène, l'autre d'oxygène, baignant dans une solution d'eau acidulée constituent une pile dont la force électromotrice en régime d'équilibre correspond à 1,1 volt environ. N'importe quel gaz, le chlore, par exemple, peut servir à constituer une électrode de cette sorte ; il suffit simplement que le liquide électrolytique contienne des ions du gaz considéré. La formule générale donnée par Nernst pour le potentiel d'une électrode peut être aussi appliquée à une électrode gazeuse.

$\varepsilon_H = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{P}{p}$, équation dans laquelle P représente la tension de dissolution de l'électrode et p , la pression osmotique des ions dans le liquide. Si on applique cette relation à un gaz comme l'hydrogène, il faut admettre que la tension de dissolution P est proportionnelle à la concentration atomique du gaz; on peut donc écrire :

$$\varepsilon_H = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{C_H}{C_{H^+}};$$

mais, aux électrodes, les phénomènes électrochimiques qui se produisent peuvent être représentés par les équilibres :



» En définitive, le dernier équilibre auquel on peut appliquer la loi d'action des masses donne :

$$C_{H_2} \times C_{H^+} = \text{constante};$$

d'où

$$\varepsilon_H = \frac{RT}{2F} \text{Log.} \frac{K C_{H_2}}{C_{H^+}}.$$

» De même un raisonnement analogue pour l'oxygène conduirait à l'équilibre $\overline{\text{O}} + \text{H}^+ \text{O} \rightleftharpoons 2 \overline{\text{OH}}$ et par suite à l'équation :

$$\varepsilon_0 = \frac{RT}{4F} \text{Log} \frac{K' C_{\text{O}_2}}{C_{\text{OH}}^2}.$$

» Si l'on considère donc une pile à gaz constituée par deux électrodes à hydrogène et à oxygène, on obtient pour la somme

$$\varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_0 = AT \frac{[K_{\text{O}} C_{\text{O}_2}]^{\frac{1}{2}} [K_{\text{H}} C_{\text{H}_2}]}{K'^{\frac{1}{2}}},$$

en tenant compte de ce fait que le produit de solubilité des éléments de l'eau est une constante, c'est-à-dire que l'on a

$$C_{\text{H}^+} \times C_{\text{OH}^-} = \text{constante}.$$

On voit par cette expression, ainsi que l'expérience le vérifie, que la force électromotrice d'une pile à gaz ne dépend pas de la concentration des ions H^+ et OH^- dans le liquide, mais dépend seulement des concentrations gazeuses entourant les électrodes.

» Pour des concentrations normales, la force électromotrice de la pile $\text{Pt} - \text{H}_2 \mid \text{O}_2 - \text{Pt}$ est de 1,1 volt.

» Si l'on compare une électrode $\text{Pt} \mid \text{H}_2$ à une électrode au calomel d'Ostwald dont on a des raisons sérieuses de penser que la force électromotrice est de 0,56 volt, on trouve — 0,277 volt ; il en résulte que celle de l'électrode à oxygène doit être de

$$1,100 - (-0,277) = + 1,377 \text{ volt}.$$

» Si l'électrolyse de l'eau était une opération réversible, elle devrait se produire pour une force électromotrice voisine de 1,1 volt. Or, elle n'est possible que si la tension devient supérieure à 1,68 volt, environ, qui caractérise la tension de décomposition minimum.

» Si l'on étudie séparément les phénomènes cathodiques et les phénomènes anodiques, on constate que les deux électrodes ne se comportent pas de la même manière.

» On vérifie qu'en présence de platine platiné la décharge de l'ion H^+ est un phénomène réversible. Il n'en est plus ainsi quand on change la nature de l'électrode.

» L'anode n'est jamais le siège de transformations réversibles, même quand elle est constituée par du platine platiné ; la surtension qui est subordonnée à des réactions chimiques secondaires dépend du métal anodique.

» SURTENSION POUR L'HYDROGÈNE. — La réversibilité cathodique n'existe plus quand la cathode n'est pas en platine platiné ; et la

surtension, qui peut devenir très notable, dépend non seulement de la nature du métal cathodique, mais encore de l'état de sa surface, comme le montre le tableau suivant :

Métal	Surtensions en volt	
	métal poli	métal spongieux
Platine.....	0,08	0,0000
Palladium	—	0,0000
Or.....	—	0,0165
Argent.....	0,495	0,097
Cuivre.....	0,415	0,135
Nickel.....	0,290	0,137
Fer dans NaOH....	—	0,087
Graphite.....	—	0,335
Cadmium.....	0,48	—
Zinc.....	0,70	—
Plomb.....	0,78	0,71
Mercure.....	0,80	—

» La seule indication un peu générale qui peut se dégager de ce tableau est la suivante : les surfaces spongieuses présentent une surtension plus faible que les surfaces des mêmes métaux polis. Cette différence est sans doute liée à l'existence d'une très grande surface développée de l'électrode dans le cas de métaux spongieux, ce qui favorise le dégagement gazeux.

» Les nombres qui sont contenus dans le tableau précédent n'ont de valeur qu'au point de vue comparatif, car les surtensions ne dépendent pas seulement des conditions de l'électrolyse : densité de courant, température, car, dans bien des cas, la surtension n'offre aucun caractère réel de stabilité ; elle varie avec la durée de passage du courant. Par exemple, pour le cuivre, le nickel, le zinc, le cadmium, la surtension passe par un maximum en fonction du temps, et elle décroît ensuite constamment. Le phénomène est, du reste, plus accentué avec les surfaces métalliques polies.

» Cette constatation permet de penser que la surtension cathodique doit être le résultat d'un équilibre instable. On peut représenter, d'une manière générale, la décharge cathodique avec surtension par une formule dérivée de celle de Nernst ; on peut écrire en effet :

$$\varepsilon_H = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{KC_H}{C_{H^+}} + \eta_H,$$

où le premier terme représente le phénomène réversible et η_H la surtension. Comme nous l'avons vu, η_H dépend de la nature de la cathode, de l'état de la surface et de la densité de courant.

» Posons $\eta_H = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{M_H}{C_H}$ avec la condition

$M_H > C_H$ pour que η_H soit positif.

En remplaçant, il vient

$$\varepsilon_H = \frac{RT}{F} \text{Log.} \frac{KM_H}{C_H}.$$

» **SURTENSION POUR L'OXYGÈNE.** — Nous avons déjà indiqué que le dégagement anodique de l'oxygène n'était pas un phénomène réversible. La surtension anodique dépend essentiellement de la nature du métal constituant l'anode et de l'état de la surface.

» Vis à vis des différents métaux, on obtient les surtensions suivantes :

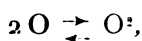
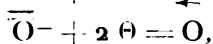
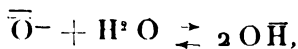
	Ni (poli)	Ni (spongieux)	Co	Fe
Surtension en volt.....	0,18	0,25	0,26	0,37
	Pt (platiné)	Pd (poli)	Pt (poli)	Au
Surtension en volt.....	0,37	0,37	0,55	0,65

» Comme pour l'hydrogène, on peut remarquer qu'en général les surtensions sont plus élevées vis-à-vis des métaux polis que pour les mêmes métaux non polis.

» Plus encore que pour l'hydrogène, ces nombres sont mal définis: ils ne correspondent qu'à des états d'instabilité qui dépendent essentiellement du temps comme le montrent les courbes suivantes (fig. 2), représentant le régime d'établissement de la tension aux bornes des électrodes pendant l'électrolyse d'une solution de KOH; 2 N avec une densité de courant de 0,033 A:cm² à la température de 15° C.

» Comme pour l'hydrogène, on peut faire appel à la relation de Nernst pour représenter la surtension anodique.

» En admettant en effet au voisinage de l'électrode positive les équilibres suivants :



on trouve :

$$\varepsilon_0 = \frac{RT}{2F} \text{Log.} \frac{K' M_O}{C_{OH}^2}.$$

» Il est extrêmement difficile de déterminer le mécanisme d'action des phénomènes de surtension. Les seuls cas pour lesquels on soit un peu fixé sont uniquement ceux relatifs à l'hydrogène et à l'oxygène. Dans le cas de la réversibilité de la décharge des cations métalliques les renseignements sont encore très insuffisants. Souvent, du reste, il est difficile de préciser s'il s'agit d'un

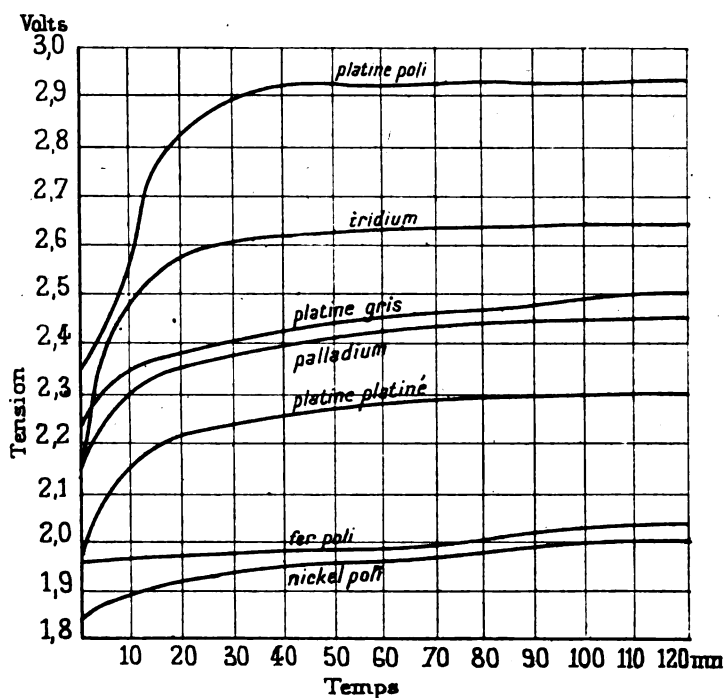


Fig. 2.

phénomène de surtension ou simplement d'un phénomène secondaire comme l'altération de la surface de l'électrode, la décharge simultanée d'un autre cation, l'hydrogène par exemple, ou encore la variation de valence du cation, ce qui est sans doute le cas des équilibres entre les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} .

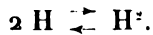
» A la vérité, le mécanisme des phénomènes de surtension est très loin d'être élucidé. Un grand nombre d'explications ont été proposées qui sont insuffisantes pour rendre compte des faits, et il est très probable que beaucoup de facteurs entrent en jeu dont certains seulement ont été examinés par ceux qui se sont occupés de cette question.

» Nernst a été un des premiers à étudier le phénomène, il pense que la cause première réside dans la difficulté qu'éprouve le gaz à se dégager sur les électrodes. Un des premiers facteurs qui conditionne ces difficultés est évidemment la facilité d'absorption que présente vis-à-vis du gaz le métal dont l'électrode est constituée; il est vraisemblable, en effet, que le gaz ne peut se dégager sous forme de bulles que lorsque les électrodes en ont occlus des quantités notables. Ainsi, lorsqu'il y a absorption, la surtension doit être faible; c'est évidemment le cas du noir de platine qui présente, à l'égard de l'hydrogène, une surtension pratiquement nulle.

» Mais il faut envisager d'un peu plus près les phénomènes de la décharge, car il est incontestable que le dégagement gazeux est le résultat de deux équilibres. En premier lieu, au contact de l'électrode, l'ion se décharge en recevant de la cathode un électron en donnant un atome suivant le mécanisme :



» En outre, la formation de l'hydrogène est subordonnée au passage de la forme atomique dans la forme moléculaire suivant le schéma :



» La loi d'action des masses appliquée à cet équilibre donne

$$C_{H_2} = k C_{H^+}^2.$$

» Il est possible d'imaginer que la nature du métal constituant la cathode exerce une influence sur l'un ou l'autre terme de cet équilibre. Mais cette manière d'envisager les choses ne fournit pas d'explication sur le mécanisme et on peut encore supposer qu'au contact de la cathode les ions, en se déchargeant, donnent lieu à la constitution d'une pellicule gazeuse qui, par suite de l'adhérence, reste solidement fixée au métal. Cette couche isolante forme un condensateur et, en raison de sa nature augmente beaucoup la résistance, ou, ce qui revient au même, elle élève la tension dans la couche de passage entourant l'électrode. Il est assez légitime de penser, dans ces conditions, que l'épaisseur de cette pellicule isolante doit être liée à l'intensité de l'absorption du gaz par l'électrode. Si le gaz est très absorbé, cette couche diélectrique doit être peu épaisse; dans le cas contraire, elle doit être d'épaisseur plus notable et introduire

par suite une résistance beaucoup plus élevée, ce qui revient à une élévation du potentiel de décharge à l'électrode.

On a supposé aussi que la tension à la surface de séparation des trois phases solides, liquides et gazeuses pouvait jouer un rôle dans le phénomène.

» Certains auteurs, tels que Moller, ont cru même y voir le facteur essentiel de la surtension. Il existe, en effet, une tension superficielle à la surface de contact de l'électrode de la solution et du gaz, cette tension est évidemment un obstacle au dégagement gazeux. Il semble que, dans certains cas, cette manière de voir puisse être considérée comme vérifiée par les faits expérimentaux. On a pu même trouver une relation entre la tension superficielle α et la surtension η pour une électrode considérée. Cette relation est de la forme

$$\eta = \frac{c \cdot \varphi - I}{b}.$$

φ représente l'angle de raccordement de la bulle au contact de l'électrode, ce qui est une mesure de la tension superficielle α ; α et b , deux constantes caractéristiques du métal constituant la cathode.

» Mais dans la plupart des cas, il est extrêmement difficile de se borner à des explications.

» Aussi a-t-on été obligé de recourir à l'hypothèse des actions chimiques secondaires. C'est toujours à des explications de cette sorte que l'on s'adresse quand on a épuisé ses possibilités d'interprétation. Il est très possible que des actions chimiques interviennent, mais elles paraissent beaucoup plus probables à l'anode qu'à la cathode, excepté dans le cas de la formation d'hydrures. On sait, en effet, avec quelle facilité certains métaux, en particulier le platine, donnent lieu à des combinaisons avec l'oxygène.

» En définitive, le phénomène est sans doute extrêmement complexe, et il doit être régi par un grand nombre de facteurs d'action dont certains ne nous sont vraisemblablement pas encore connus. Mais il y a lieu de penser que, très probablement, les divers paramètres qui viennent d'être rapidement passés en revue, doivent plus ou moins intervenir en raison des succès partiels auxquels ils conduisent pour expliquer les phénomènes de surtension. Du reste, à mesure que cette question est l'objet de recherches nouvelles, on découvre l'importance de nouveaux fac-

teurs d'action dont le rôle avait jusqu'alors passé inaperçu. C'est ainsi que tout récemment (1922), N. Igarischew et Sophie Bergmann, en étudiant systématiquement les phénomènes de surtensions anodiques, ont découvert que le point de décomposition anodique dépendait essentiellement du cation et était entièrement indépendant de la tension superficielle et du degré de dissociation. En déterminant, par l'application de la loi de Stokes aux ions, le degré d'hydratation des cations étudiés, ces auteurs ont montré qu'il devait exister une relation entre les phénomènes de surtension anodique et le degré d'hydratation des ions.

» Ce simple exemple montre combien doit être complexe le phénomène et combien doivent être nombreux les divers facteurs qui le conditionnent.

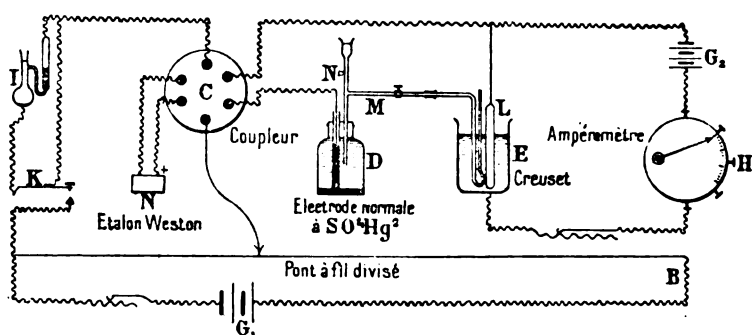


Fig. 3.

» Dans le but d'élucider le mécanisme suivant lequel les colloïdes interviennent dans les phénomènes électrochimiques, M. C. Marie a entrepris dès 1908 des recherches systématiques relatives à l'influence de ces substances sur le potentiel cathodique ⁽¹⁾.

» Ces expériences se rapportent, pour la plupart, au potentiel de dégagement de l'hydrogène sur divers métaux. Les mesures ont été effectuées au moyen du dispositif expérimental représenté dans la figure 3.

» En E, un grand creuset de platine contenait l'électrode L, repérée en hauteur et en position par un dispositif très simple et

(¹) Ce travail a fait l'objet d'une courte note dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXLVII, 1908, p. 1 400; Le mémoire lui-même a été publié au Congrès scientifique international de Buenos-Ayres, juillet 1910 et publié dans la *Revista del Museo de La Plata*, t. 17. Étant donné que ce périodique est à peu près inaccessible, il nous a paru utile de décrire la méthode expérimentale employée et les principaux résultats obtenus.

placée le plus souvent dans un vase poreux. Un courant d'eau maintenait le creuset E à une température constante. La prise de courant au contact de l'électrode était faite au moyen du tube représenté par la figure 4 ci-contre en grandeur réelle. Cette forme est particulièrement commode pour éviter les ennuis causés par les bulles de gaz qui tendent à se loger dans les tubes capillaires. (En *a* le tube présente un petit trou).

» *Solution.* — L'acide sulfurique normal était préparé au moyen d'acide pur du commerce exempt d'arsenic. L'acide circulait constamment dans l'appareil. La circulation était obtenue

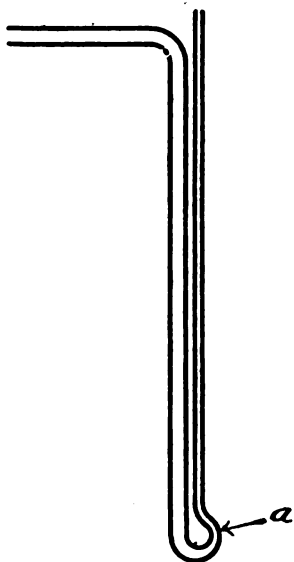


Fig. 4.

très simplement en faisant arriver l'acide neuf par un tube au fond du creuset ; un siphon à niveau réglable enlevait constamment l'excès d'acide par la surface. Dans le cas où on employait un vase poreux, l'arrivée d'acide neuf se faisait dans celui-ci, l'acide débordait simplement dans le creuset où le niveau était maintenu un peu plus bas par le siphon.

» *Electrodes.* — Les électrodes étaient constituées par des cylindres de 10 centimètres de longueur ($D = 0,85$ cm). Elles étaient portées par des tiges en cuivre soudées ; un morceau de tube de caoutchouc protégeait la soudure contre les pulvérisations d'acide.

» *Mesures.* — Dans les courbes que nous reproduisons plus

loin, les valeurs données en ordonnées correspondent aux lectures faites sur la règle. Pour simplifier les calculs, on s'arrangeait toujours pour que l'élément normal fournit une valeur simple 300 ou 500.

» Les valeurs obtenues permettent ainsi de calculer la force électromotrice de la pile : électrode — SO_4H^2 — électrode normale. Pour en déduire les différences de potentiel cathode --- solution, il suffit de se rappeler que, pour l'électrode normale au sulfate, on a $E = 0,56 \text{ v}$ ($\text{SO}_4\text{H}^2, \text{N}$). Les résultats obtenus avec ce dispositif ont été les suivants :

» Platine platiné. — Pour ce métal, l'électrode était constituée par un cylindre de cuivre recouvert d'un tube de platine. La courbe de la figure 5 montre que les colloïdes sont sans

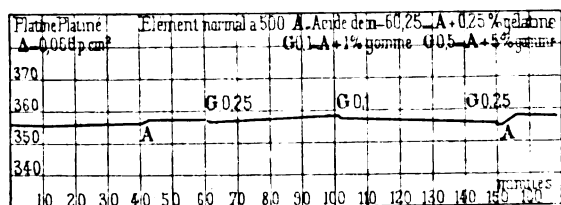


Fig. 5.

action. Les points G 0,25, G 0,1, G 0,5 correspondent, en effet, au remplacement de l'acide pur (A) par le même acide contenant 0,25 pour 100 de gélatine ou 1 ou 5 pour 100 de gomme. Le potentiel d'une électrode dans ces conditions a d'ailleurs une valeur extrêmement stable. De nombreuses expériences permettent de constater qu'il demeure constant à moins de 0,001 v pendant un temps quelconque. La mesure de la force électromotrice montre que, dans ces conditions, la valeur de la surtension est d'environ 0,05 v. Le platinage de l'électrode est sans action sur cette valeur.

Plomb. — Dans le cas du plomb, le creuset de platine était remplacé par un creuset de plomb ayant exactement les mêmes dimensions. Les expériences sur ce métal demandent des précautions toutes particulières, spécialement en ce qui concerne la pureté des réactifs. Ainsi que l'avait montré Tafel (1) antérieurement, les traces d'arsenic et de platine ont une influence consi-

(1) TUFIL. Zeitschrift für physikalische Chemie, t. I., p. 708.

dérable sur le potentiel. L'influence de la gélatine n'a été étudiée que sur les électrodes dont le potentiel cathodique demeurait constant pendant des heures entières. Les résultats obtenus sont représentés par les courbes de la figure 6.

» Sur ces courbes, les points marqués A correspondent à l'acide

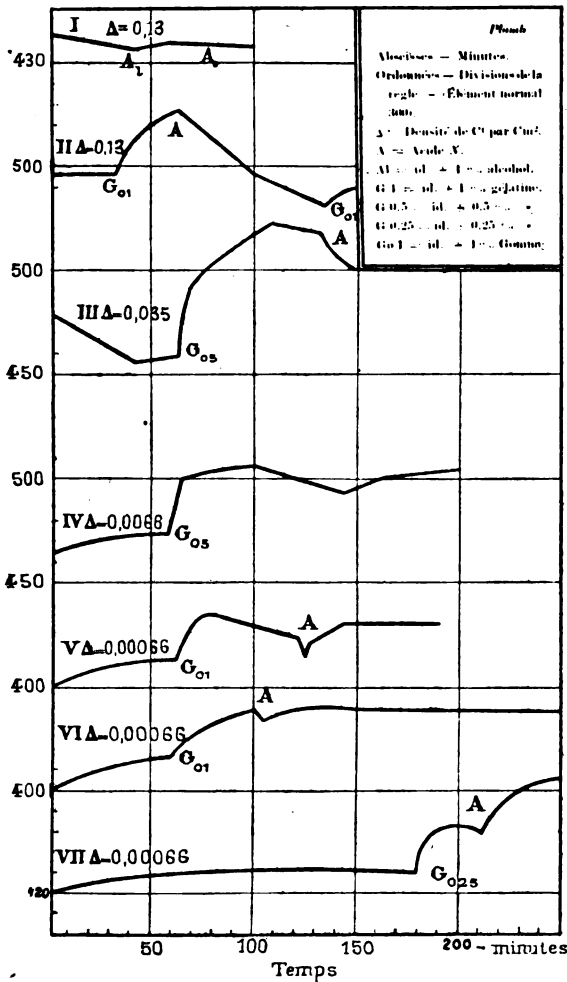


Fig. 6.

sulfurique normal pur ; les points marqués G ou Go correspondent au remplacement de cet acide sulfurique par le même acide additionné de gélatine ou de gomme.

» Sans entrer dans le détail de ces expériences, on peut dire qu'elles montrent que les colloïdes amènent rapidement l'élec-

trode dans les régions des hauts potentiels auxquels Tafel a donné le nom de *Elevationswerte*. Ces expériences montrent également que l'action du colloïde stabilise ces potentiels élevés qui tendent toujours à tomber.

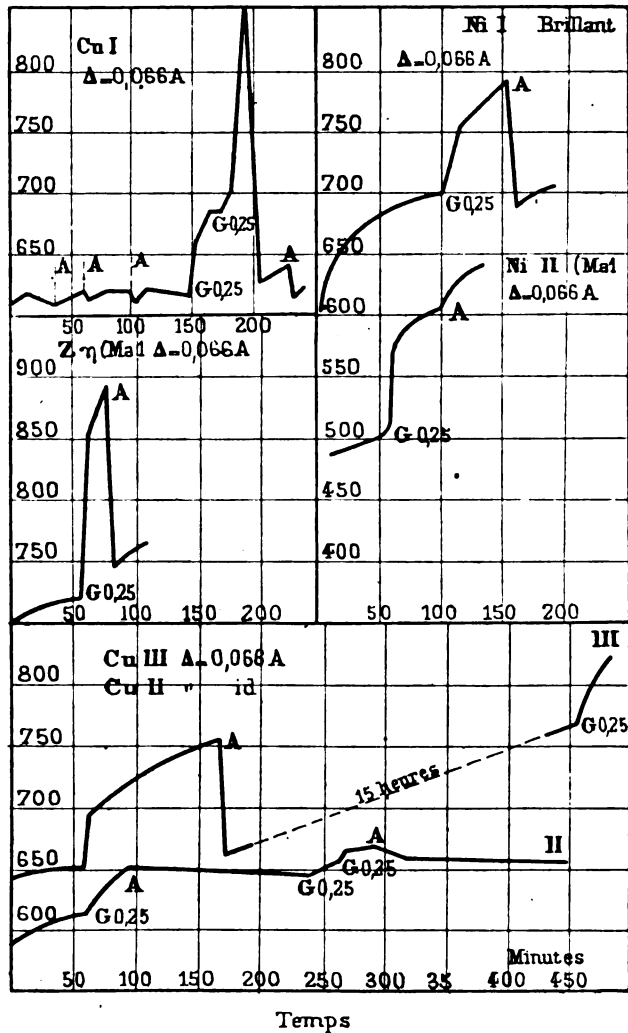


Fig. 7.

» Des expériences analogues ont été faites avec des électrodes en nickel, en zinc et en cuivre. Les résultats obtenus sont représentés par les courbes des figures 7 et 8.

» Elles montrent que l'action de la gélatine ou de la gomme est générale. Aussitôt que l'on remplace l'acide pur par l'acide

contenant le colloïde, le potentiel s'élève d'une manière considérable pour retomber quand de nouveau on remet l'acide pur.

» Les expériences avec le cuivre ont donné, outre les résultats généraux observés avec les autres métaux, des résultats particuliers que nous croyons utiles de signaler avec quelques détails.

» La courbe I de la figure 7 correspond à une électrode cuivrée dans un bain de nitrate additionné de SO^4H^2 et placée simplement dans le creuset de platine sans vase poreux. De temps en temps, on siphonnait brusquement le liquide pour le rempla-

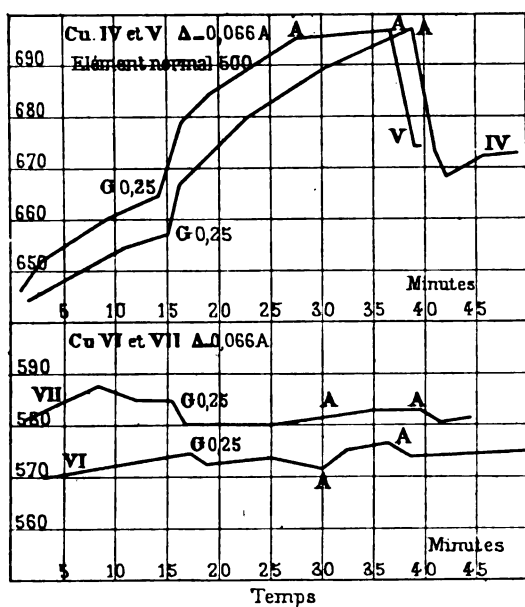


Fig. 8.

cer ensuite par de l'acide neuf (A), soit par de l'acide contenant de la gomme ou de la gélatine. Les irrégularités considérables observées dans cette expérience sont dues à l'absence de vase poreux, car les courbes II et III obtenues en présence d'un vase poreux sont beaucoup plus régulières. Les potentiels atteints dépassent d'ailleurs de beaucoup ceux indiqués par Tafel (1,40 v). La valeur atteinte dans la courbe III correspond à 1,56 v après 15 heures, et s'élève par une addition de gélatine à 1,65 v sans que rien n'indique que le maximum soit atteint.

» Il était intéressant de voir si les électrodes cuivrées dans un

bain contenant la gélatine auraient des propriétés particulières. Les courbes de la figure 8 montrent que les électrodes cuivrées en présence de la gélatine ont des potentiels beaucoup plus bas, mais plus stables. Les courbes IV et V correspondent en effet à des électrodes cuivrées en l'absence de gélatine ; les courbes VI et VII à des électrodes cuivrées en présence de 0,3 pour 100 de gélatine.

» Il convient de rappeler ici que le métal déposé dans ces conditions n'est pas pur ; on a montré qu'il pouvait contenir environ 2 pour 100 d'impuretés (matières organiques). Les propriétés spéciales de ces électrodes cuivrées en présence de gélatine sont

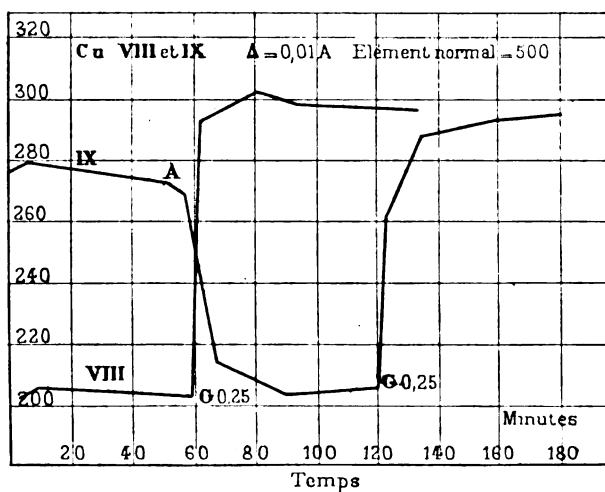


Fig. 9.

probablement, par suite, en relation avec ce changement dans la composition.

» Il était intéressant de vérifier si des phénomènes analogues pouvaient être observés quand, au lieu d'électrolyser de l'acide sulfurique pur, on électrolysait une solution de sulfate de cuivre, telle que celle employée pour le dépôt de ce métal. L'expérience directe faite en mesurant, dans des conditions tout à fait spéciales, la différence de potentiel, aux bornes de deux électrolyseurs remplis de la même solution cuivrique contenant un peu de gélatine pour l'un d'eux, répond immédiatement à la question ; on constate en effet une différence de potentiel de 0,2 v en faveur du bain contenant de la gélatine.

» Les courbes de la figure 9 donnent une idée plus précise du

phénomène ; la gélatine relève d'une manière importante le potentiel cathodique (0,2 v environ). La courbe VIII montre combien le potentiel s'élève brusquement quand on remplace le bain ordinaire par le même contenant 0,25 pour 100 de gélatine. La courbe IX donne une idée encore plus complète des faits ; dans la première partie avant A, le bain contient de la gélatine; on le remplace par le bain pur, le potentiel s'abaisse au niveau de la première branche de la courbe VIII pour remonter dès que le bain gélatiné est de nouveau employé.

» En résumé, on voit donc que ces recherches montrent que l'addition de petites quantités de colloïdes (gomme ou gélatine) à des bains acides, provoque une élévation brusque et considérable du potentiel de dégagement de l'hydrogène, mais seulement pour les métaux présentant une surtension: plomb, zinc, cuivre. Avec le platine platiné dont la surtension est nulle, cette élévation ne se produit plus. On constate, d'autre part, que la gélatine exerce aussi une action tout à fait analogue sur le potentiel de précipitation d'un métal comme le cuivre.

» Ces résultats doivent être rapprochés des recherches tout à fait récentes, entreprises dans un but différent par M. René Audubert et relatées dans « Comptes-rendus de l'Académie des Sciences », t. CLXXVI, 1923, p. 838. Nous exposerons maintenant ces expériences.

» Si l'on ajoute de la gélatine à une pile de concentration de la forme $\text{NO}^3\text{Ag}, C - \text{NO}^3\text{Ag}, c$ on obtient une variation de la force électromotrice qui peut être, soit une augmentation, soit une diminution suivant que l'addition est faite à l'une ou à l'autre extrémité de la chaîne. Si on suppose, par exemple, $C > c$, une addition de gélatine dans le compartiment contenant $\text{NO}^3\text{Ag}, C$, provoque une diminution de la force électromotrice de cette pile de concentration, tandis qu'en ajoutant, au contraire, le colloïde dans la solution $\text{NO}^3\text{Ag}, c$, on obtient une augmentation. La force électromotrice des piles de concentration est représentée avec beaucoup d'exactitude par la formule de Nernst.

$$\epsilon = \frac{RT}{96540} \text{Log. } \frac{C}{c}.$$

» On voit, dans ces conditions, que ϵ diminue avec C et augmente, au contraire, quand c diminue.

» L'expérience donne par exemple :

Ag NO ³ , N	—	Ag NO ³ , N/1 000	0,180 volt.
Ag NO ³ , N + gélatine	—	Ag NO ³ , N/1 000	0,174 volt.
Ag NO ³ , N	—	Ag NO ³ , N/1 000 + gélatine	0,230 volt.
Ag Cl	—	NO ³ Ag, N/10	0,435 volt.
Ag Cl — NO ³ Ag, N/10	+	gélatine à 0,4 0/0	0,430 volt.
Ag Cl + gélatine à 0,4 0/0	—	NO ³ Ag, N/10	0,450 volt.

» Il est plus commode d'employer des chaînes dont l'extrémité est constituée par des sels insolubles comme Ag Cl, AgI, AgBr, Ag²S. Dans ces cas, la force électromotrice de l'élément est beaucoup plus élevée; la très faible solubilité de ces sels permet, en effet, de réaliser des concentrations très faibles en ions Ag⁺. Dans tous les cas, l'addition de la gélatine modifie la force électromotrice de la chaîne comme si la concentration des ions Ag⁺ dans le compartiment où elle est ajoutée était diminuée.

» Une addition de cette substance dans le compartiment où existent les plus fortes concentrations en ions Ag⁺ diminue la force électromotrice, tandis qu'une addition dans le compartiment où la concentration en ions Ag⁺ est la plus faible l'élève.

» On est donc amené à conclure que, dans les deux cas, la gélatine fixe des ions Ag⁺, lesquels perdent ainsi vis-à-vis de l'électrode leur activité électrochimique.

» L'étude de l'influence de la gélatine sur la force électromotrice des piles de concentration permet de déterminer la quantité de cations fixés par le colloïde.

» Si, en effet, on ajoute ce dernier dans l'un des compartiments, par exemple, dans celui qui contient le liquide le plus concentré C, on obtient une force électromotrice ε' plus petite que la force électromotrice ε mesurée avant l'addition. Avant d'introduire la gélatine, on avait

$$\varepsilon = \frac{RT}{96\,540} \text{Log.} \frac{C}{c}.$$

» Après l'introduction du colloïde, on mesure une force électromotrice ε' plus petite qui correspond à une nouvelle concentration C' d'ions; Ag⁺; on a

$$\varepsilon' = \frac{RT}{96\,540} \text{Log.} \frac{C'}{c};$$

la connaissance de la différence $\varepsilon - \varepsilon'$ permet de calculer le taux

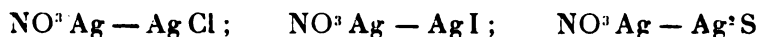
de la fixation des cations métalliques par le colloïde ; on a, en effet,

$$\frac{C}{c} = e^{\frac{96540 \varepsilon}{RT}} ; \quad \frac{C'}{c} = e^{\frac{96540 \varepsilon'}{RT}} ;$$

par suite :

$$\frac{C - C'}{c} = e^{\frac{96540 \varepsilon}{RT}} - e^{\frac{96540 \varepsilon'}{RT}} .$$

» M. Audubert a, en outre, étudié l'influence de la concentration des ions Ag^+ sur l'intensité de la fixation de ces derniers par la gélatine. Dans ce but, il a opéré sur les chaînes suivantes :



en ajoutant le colloïde dans la solution de nitrate d'argent et en faisant varier la concentration de cette dernière.

» Dans ces expériences, la concentration de l'azotate d'argent a varié entre N et $\frac{N}{10000}$ pour une quantité de gélatine qui, suivant les expériences, était comprise entre 0,04 pour 100 et 0,5 pour 100. Les résultats montrèrent que la quantité d'ions fixés, u , par les micelles colloïdales était une fonction continue de la concentration C' des ions Ag en équilibre avec la gélatine.

» A titre d'exemple, l'ordre de grandeur de cette variation est indiqué dans les nombres suivants :

Chaîne $\text{AgCl} - \text{NO}^3 \text{Ag}$

Concentration en $\text{NO}^3 \text{Ag}$	ε , en volt	ε' , en volt
$N/10$	0,496	0,494
$N/100$	0,431	0,425
$N/500$	0,388	0,380
$N/1000$	0,374	0,365
$N/5000$	0,331	0,317

Chaîne $\text{AgI} - \text{NO}^3 \text{Ag}$

Concentration en $\text{NO}^3 \text{Ag}$	ε , en volt	ε' , en volt
$N/10$	0,859	0,857
$N/100$	0,800	0,795
$N/500$	0,760	0,760
$N/1000$	0,742	0,738
$N/5000$	0,716	0,675
$N/10000$	0,683	0,640

» En construisant les courbes en coordonnées logarithmiques, on voit facilement que l'on a des droites que l'on peut représenter par la relation :

$$\text{Log. } u = p \text{ Log. } C' + k.$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$u = AC'^p.$$

» Pour toutes les expériences le coefficient p est, aux erreurs d'expérience près, toujours égal à $\frac{1}{2}$.

» La relation précédente est bien connue : elle a été donnée par Freundlich, comme représentant une isotherme d'adsorption; aussi, est-on conduit à penser que la gélatine fixe l'argent, vraisemblablement, en formant avec lui un complexe d'adsorption.

» Les expériences montrent que la quantité d'ions Ag^+ adsorbée par la gélatine est indépendante de la nature du couple; elle ne dépend, pour une même quantité de gélatine, que de la concentration de la solution d'azotate d'argent. On observe des écarts quand on passe d'une solution de gélatine à une autre; ces écarts tiennent à ce fait que les propriétés physicochimiques de la gélatine ne sont bien déterminées que lorsque l'on connaît son P_H . Et il serait particulièrement intéressant de déterminer par cette méthode le taux de la fixation d'ions Ag^+ par la gélatine quand on fait varier le P_H de cette dernière.

» Néanmoins, comme le montrent les nombres suivants, la quantité adsorbée reste bien indépendante de la nature de la chaîne et ne dépend que de la concentration des ions Ag^+ quand on prend la précaution d'employer des solutions de gélatine préparées de la même manière. Du reste, même dans le cas contraire, les écarts ne sont jamais notables.

» Dans ces exemples, on faisait varier pour une même concentration en NO_3Ag la concentration des ions Ag^+ dans le compartiment contenant le sel insoluble, en produisant la précipitation dans des conditions différentes. Par exemple, dans le cas du chlorure d'argent, comme le montre la relation $\text{Ag}^+ \times \text{Cl}^- = \text{constante}$, il suffit d'augmenter la concentration des ions Cl^- pour diminuer celle des ions Ag^+ ; on y parvient en employant pour la précipitation des concentrations plus élevées de K Cl .

pour $\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{10}$	$\left\{ \begin{array}{l} u = 34,0 \text{ N. } 10^{-4} \\ u = 35,5 \text{ N. } 10^{-4} \end{array} \right.$
	$\frac{N}{100}$	$\left\{ \begin{array}{l} u = 18,6 \text{ N. } 10^{-4} \\ u = 19,0 \text{ N. } 10^{-4} \end{array} \right.$
$\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{500}$	$\left\{ \begin{array}{l} u = 4,1 \text{ N. } 10^{-4} \\ u = 4,0 \text{ N. } 10^{-4} \end{array} \right.$
	$\frac{N}{1000}$	$\left\{ \begin{array}{l} u = 3,1 \text{ N. } 10^{-4} \\ u = 3,0 \text{ N. } 10^{-4} \end{array} \right.$
Pile $\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{10} - \text{Ag I}$	$u = 35,0 \text{ } 10^{-4} \text{ N.}$
Pile $\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{10} - \text{Ag Cl}$	$u = 34,0 \text{ } 10^{-4} \text{ N.}$
Pile $\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{500} - \text{Ag I}$	$u = 4,0 \text{ } 10^{-4} \text{ N.}$
Pile $\text{NO}^3 \text{Ag}$	$\frac{N}{500} - \text{Ag Cl}$	$u = 4,0 \text{ } 10^{-4} \text{ N.}$

» Ces résultats, d'après lesquels on peut songer à l'existence d'une combinaison d'adsorption entre la gélatine et l'argent, doivent être rapprochés de ceux obtenus récemment ⁽¹⁾ par M. Audubert sur l'adsorption des ions par la gomme gutte et le mastic. En étudiant, par la détermination microscopique de la vitesse de ces granules dans le champ électrique, la quantité d'ions fixés en équilibre avec celle présente dans le liquide intergranulaire, il a vérifié que l'adsorption de différents ions, tels que Na^+ , K^+ , H^+ , Ba^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , La^{+++} par le mastic et la gomme gutte, pouvait être représentée par la formule

$$U = AC^p$$

dans laquelle l'exposant p était indépendant de la nature de l'ion adsorbé et de celle de la surface adsorbante ; pour tous les cas, p était égal à $1/2$. Cette concordance permet d'imaginer que le facteur essentiel qui régit, dans tous ces cas, le mécanisme de la fixation doit être de nature électrostatique, c'est le seul qui soit commun à tous les exemples précédents. Vraisemblablement, c'est sans doute aussi un processus électrostatique qui détermine la fixation de l'argent par la gélatine.

» Quoi qu'il en soit, cette substance doit modifier la différence de potentiel de contact de l'électrode en raréfiant l'atmosphère ionique, vraisemblablement dans la couche de passage qui lui

⁽¹⁾ R. AUDUBERT : Action de la lumière sur les suspensions. *Ann. de Physique*, sept. 1922. — Action de la lumière sur les équilibres d'adsorption. Communication à la Société française de Physique (17 novembre 1922).

est contiguë et qui est le siège des phénomènes électrochimiques.

» Si l'on extrapole ces résultats à l'action de la gélatine sur les phénomènes de surtension, on peut penser que c'est en adsorbant les ions H^+ ou $\overline{OH}$ que la gélatine intervient. Il ne faut pas oublier, en effet, qu'elle constitue un colloïde amphotère, et que c'est à cette propriété qu'elle doit l'action qu'elle exerce aussi bien sur les réactions anodiques que sur les transformations cathodiques ⁽¹⁾.

» En raison des actions électrostatiques, les micelles colloïdales s'approchent des électrodes en entraînant avec elles un cortège d'ions qui leur sont fixés par adsorption. Dans ces conditions la concentration dans la couche de passage est évidemment diminuée ; par suite, la force électromotrice de passage est augmentée suivant la formule :

$$E = \frac{RT}{v \times F} \text{Log. } \frac{P}{p}.$$

» Cette manière de voir est confirmée, d'une part, par les expériences de M. C. Marie, relatives à l'influence de la gélatine sur le potentiel de décharge de l'ion cuivre ; d'autre part, par des recherches récentes de Igarischew et Sophie Bergmann, qui ont étudié l'influence de la gélatine sur la surtension de l'hydrogène, mais, en faisant varier la concentration du colloïde. Ces auteurs ont observé que l'effet dû à la gélatine passe par un maximum quand on fait régulièrement croître le taux d'addition du colloïde. Après avoir envisagé toutes les explications possibles pour l'existence d'un tel maximum, ils concluent que seule l'hypothèse d'un complexe d'adsorption entre le colloïde et l'ion conduit à des résultats satisfaisants. Si, en effet, il s'agissait d'une combinaison chimique ordinaire, l'effet produit sur la surtension devrait rester invariable à partir de la concentration de gélatine donnant l'effet le plus élevé. Si elle diminue, c'est sans doute à cause de la variation que subit le degré de dispersion du colloïde quand sa concentration varie ; il en résulte, nécessairement, une modification de l'équilibre d'adsorption entre la gélatine et l'ion.

(1) On a remarqué, en effet, que la gélatine n'intervient sur les phénomènes cathodiques, par exemple, sur les dépôts métalliques, qu'en solution acide ; dans ce cas, en effet, les micelles du colloïde chargées positivement se transportent vers la cathode ; mais, comme la gélatine est un amphotère en solution alcaline, elle peut se charger négativement et se transporter vers l'anode.

» On peut donc admettre, en ce qui concerne l'action de la gélatine sur la surtension, qu'elle doit vraisemblablement fixer les ions de l'électrolyte par adsorption électrocapillaire et par suite modifier la différence de potentiel de passage.

» Enfin, il est possible que la gélatine intervienne par sa viscosité. M. C. Marie a trouvé que les solutions gélatinées qu'il a employées pour faire ces recherches avaient sensiblement la même viscosité que les électrolytes sans gélatine. Mais il ne faut pas oublier que, dans de telles conditions, des mesures de viscosité n'ont pas une grande signification, car elles ne renseignent nullement sur la viscosité dans la couche de passage entourant l'électrode et dont on est sûr maintenant qu'elle a une constitution extrêmement différente du reste du liquide. Il se pourrait donc que, dans cette gaine riche en micelles colloïdales, par suite de l'adsorption de ces dernières par l'électrode, grâce à leur charge, et grâce aussi au sens de la polarisation du métal, la viscosité élevée de cette couche de passage entraînât un déplacement dans le jeu des équilibres de transformation. En particulier, si l'on considère les phénomènes cathodiques, on a, comme nous l'avons vu, les deux transformations suivantes :



Un accroissement de la viscosité doit nécessairement entraîner un retard dans le deuxième équilibre et, par suite, donner lieu à l'accroissement de la tension que l'expérience révèle.

» L'absence de surtension ou plutôt la très faible surtension constatée avec le platine platiné ne doit pas, en réalité, représenter une exception. Il est probable que l'état du métal favorise si énergiquement la réaction (2) que l'action du colloïde en est pratiquement masquée.

» En résumé, les expériences très différentes les unes des autres que nous venons d'exposer, quelque intéressantes qu'elles puissent être au point de vue pratique, confirment simplement la complexité des phénomènes de surtension et l'insuffisance des explications qui en sont données actuellement. Il serait extrêmement intéressant de pouvoir poursuivre ces recherches d'une manière systématique, pour montrer, en particulier, avec précision, comment elles expliquent les constatations empiriques faites depuis si longtemps par tous ceux qui se sont occupés du dépôt électrolytique des métaux. »

CALCUL DES LIGNES DE TRANSMISSION A GRANDE DISTANCE

Le calcul des lignes de transmission, réduit strictement à ce que justifient les exigences de la pratique, peut s'effectuer pour une distance quelconque, d'une manière tout à fait uniforme et sans introduire aucune simplification arbitraire, et aboutit ainsi à un diagramme facile à construire, qui synthétise l'ensemble des résultats numériques en lesquels consiste la solution du problème posé.

Nous nous sommes proposé, d'autre part, dans la note annexe, de montrer en quel sens le mode moderne de fonctionnement d'une ligne de transmission, le long de laquelle la tension est maintenue à peu près constante en un nombre de points suffisant au moyen de machines ou compensateurs synchrones, peut être considéré comme constituant un régime sans onde de retour, et à rendement optimum, suivant le point de vue qui a été développé par M. Boucherot ; la résistance caractéristique y remplace seulement la tension comme grandeur variable dont l'adaptation continue maintient à toute charge un régime approximativement sans déphasage.

M. DARRIEUS. — « Le calcul des lignes de transmission, en tenant compte de la distribution continue de l'inductance et de la capacité, a déjà donné lieu à un très grand nombre de travaux ; mais, en dehors des mémoires fondamentaux, leur abondance et leur diversité pour un problème aussi délimité ne tiennent qu'à des différences non essentielles dans l'exposition d'une seule et même solution, ou à des développements d'importance secondaire, même au point de vue théorique, que l'épreuve pratique des diverses méthodes a fait laisser de côté.

» Nous nous proposons, par un exposé aussi succinct que possible, de montrer, d'une part, que les divers points de vue envisagés dans ces travaux peuvent être conciliés d'une manière simple, et que, sans rien perdre en généralité, il est possible d'en incorporer les principaux résultats, notamment ceux obtenus récemment en France, à la forme d'emploi la plus pratique, qui a été principalement développée aux Etats-Unis dans ces dernières années, à l'occasion des applications très étendues qui y ont été réalisées de transmission d'énergie à grande distance.

» Suivant un exemple constant dans les applications du calcul à l'art de l'ingénieur, cette forme consiste en un emploi combiné du calcul et du graphique. Quelque préférence personnelle que l'on puisse avoir pour l'un ou l'autre, on conviendra généralement que, si un recours trop étendu au graphique tend souvent à une excessive complication, par contre, aucun tableau numérique ne saurait remplacer, dans la solution d'un problème comportant un aussi grand nombre de variables que le calcul des lignes, la représentation visuelle à 2 ou 3 dimensions que constitue un diagramme : il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue que si, dans chaque cas concret, certaines quantités, tension, puissances

active et réactive à transmettre, etc., définissent formellement le problème, ces données sont rarement impératives, mais, comportant généralement une large part d'arbitraire, sont sujettes presque toujours à être révisées.

» A cet égard, tandis que le calcul numérique, même traduit en courbes, n'est susceptible de fournir que des résultats isolés, répondant à des données plus ou moins heureusement choisies, sujets, d'autre part, à des erreurs qui, même grossières, sont difficiles à déceler, le diagramme permet d'embrasser à la fois, sans les disjoindre arbitrairement, tout l'ensemble des résultats possibles, qui seul constitue à proprement parler la solution.

» Les autres préoccupations qui nous ont guidé ont été de simplifier autant que possible l'exécution des calculs numériques, de limiter le nombre de symboles en gardant les notations classiques, d'éviter l'emploi d'aucune table ou abaque spécial, dont l'inconvénient est de ne pas laisser de trace graphique des opérations effectuées, enfin de limiter constamment l'approximation à celle des mesures industrielles les plus soignées.

» La règle à calcul devrait toujours suffire à l'ingénieur, et il paraît bien inutile de recourir à la table de logarithmes, si l'approximation plus serrée ainsi obtenue est compromise ensuite, soit par une marche peu favorable du calcul, soit dans l'exécution de constructions graphiques compliquées.

EXPOSÉ GÉNÉRAL DES MÉTHODES CLASSIQUES DE CALCUL DES LIGNES

» La solution générale de l'équation différentielle du second ordre de la propagation en régime permanent du courant ou de la tension le long d'une ligne comportant résistance, inductance et capacité réparties, peut être présentée sous deux formes principales suivant le choix du type des deux solutions particulières en lesquelles on décompose la solution générale.

» La première (Vaschy, Heaviside, Pupin), principalement employée en téléphonie ou pour la théorie des surtensions, représente le régime permanent comme résultant de la superposition de deux ondes mobiles se propageant le long de la ligne à une vitesse voisine de celle de la lumière, l'une directe, dans le sens de la transmission, l'autre réfléchie, en sens inverse.

» La tension U_0 et le courant I_0 au départ ont ainsi pour expression sous forme complexe, en appelant M et N les valeurs à l'arrivée ($x = 0$) des deux ondes de la tension :

$$U_0 = Me^{\sqrt{ZY}} + Ne^{-\sqrt{ZY}},$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{Y}{Z}} Me^{\sqrt{ZY}} - \sqrt{\frac{Y}{Z}} Ne^{-\sqrt{ZY}},$$

où Z et Y représentent respectivement l'impédance et l'admittance complexes par unité de longueur multipliées par la longueur de la ligne :

$$Z = R + j\omega L = R + jX,$$

$$Y = G + j\omega C = G + jH.$$

» R , L , G , C sont respectivement la résistance, l'inductance, la perditance et la capacité par phase et par unité de longueur, multipliées par la longueur de la ligne.

» Nous supposons toujours $G = 0$, car, outre que les lignes industrielles ne doivent présenter dans les conditions normales que des pertes par effluves nulles ou négligeables, ces pertes, si elles existent, sont toujours très inégalement réparties le long de la ligne et surtout, ne se manifestant qu'au-dessus d'une tension critique, ne suivent nullement la loi quadratique que suppose l'emploi de G ; quant aux pertes par conductance proprement dites qui obéiraient à cette loi, elles sont généralement très faibles par rapport aux pertes Joule.

» Dans chacune de ces ondes de longueur d'onde voisine de $\frac{300\,000}{50} = 6\,000$ km à la fréquence de 50 p.s, et qui correspondent au régime sans déphasage de M. Blondel, la tension légèrement en retard sur le courant, d'un angle constant égal à $\frac{1}{2} \text{ arc tg } \frac{R}{\omega L}$, conserve avec lui un rapport constant égal au module de $\sqrt{\frac{Z}{Y}}$. Cette résistance caractéristique $\mathcal{R}_0$ égale appro-

ximativement à $\sqrt{\frac{l}{c}}$, où l et c sont respectivement l'inductance et la capacité par phase et par unité de longueur, et qui joue un rôle fondamental dans la propagation des surtensions, varie dans d'étroites limites, 300 à 450 ohms, depuis les lignes télégraphiques jusqu'aux plus grosses lignes de transmission d'énergie, et est à peu près indépendante de la fréquence si cette dernière n'est pas trop faible, ou si l'on suppose la résistance minime, comme c'est le cas pour les fortes sections, où elle n'atteint parfois que le cinquième de la réactance.

» La décroissance exponentielle de la tension et du courant le long de la ligne, s'exprime donc par le même facteur d'affaiblissement sensiblement égal à $e^{-\frac{1}{2} \frac{R}{\mathcal{R}}}$, ce qui donne au rendement dans le régime sans onde de retour l'expression particulièrement simple $e^{-\frac{R}{\mathcal{R}}}$. Il est à remarquer cependant que cette valeur singulière, caractéristique de la ligne et indépendante de la tension et de la fréquence, n'est pas maximum, et est même inférieure en général au rendement le plus convenable.

» C'est, en effet, que, si la forme linéaire des équations différentielles nous permet de combiner deux solutions particulières en ajoutant simplement les valeurs respectives des tensions, courants, charges électriques, flux, il n'en va pas de même des puissances qui sont fonction quadratique de ces quantités, et dans lesquelles la superposition introduit de nouveaux termes, produits de la tension d'un régime par le courant de l'autre.

» Les pertes notamment ne peuvent être séparées en deux parties, afférentes l'une à l'onde directe, l'autre à l'onde réfléchie, sauf dans le cas très particulier des lignes sans déformation, où le déphasage est nul et l'affaiblissement indépendant de la fréquence, et qui répondent à la condition d'Heaviside :

$$\frac{r}{g} = \frac{l}{c} = \frac{r + j \omega l}{g + j \omega c}.$$

» Ainsi, dans le cas des lignes industrielles, où r existe seul, g étant nul ou négligeable, l'interférence de l'onde directe et de l'onde réfléchie annule la perte résultante au voisinage des nœuds de courant, par exemple à l'arrivée dans le régime à vide.

» Si les spirales logarithmiques, qui représentent chacune des deux ondes dans le diagramme, sont faciles à calculer ou à construire graphiquement à l'aide d'une roulette, suivant un procédé indiqué par M. Parodi, l'inconvénient de cette première forme de solution est d'introduire en même temps que deux constantes supplémentaires, M et N , la résistance caractéristique et le déphasage correspondant, et, d'autre part, de ne pas se raccorder naturellement au mode élémentaire de calcul qui suffit pour les lignes courtes et à basse tension.

» Si elle fait ressortir certains aspects importants de la solution, la décomposition en ondes mobiles qu'elle représente n'est

ni plus ni moins exacte physiquement que celle en ondes stationnaires qui correspond à la deuxième forme de solution :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_0 = U_1 \cosh \sqrt{ZY} + Z_1 I_1 \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}}, \\ I_0 = YU_1 \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} + I_1 \cosh \sqrt{ZY}, \end{array} \right. \quad (1)$$

où les deux constantes d'intégration U_1 et I_1 sont précisément les tension et courant à l'arrivée, et qui de ce fait convient mieux au calcul des lignes industrielles.

» Les deux termes en U_1 et I_1 correspondent à deux systèmes d'ondes stationnaires présentant respectivement un ventre de tension et de courant à l'arrivée, ce qui revient à envisager le régime en charge comme la superposition d'un régime à vide et d'un régime en court-circuit (théorème de Blondel).

» Le calcul des fonctions hyperboliques complexes contenues dans les relations ci-dessus peut se faire, soit avec les tables du professeur Kennelly, soit avec les abaques de R.-S. Brown ou de Blondel ⁽¹⁾, mais il est beaucoup plus simple et plus rapide, même pour les plus longs tronçons homogènes de ligne que l'on puisse envisager, de recourir, comme l'a indiqué M. Blondel lui-même ⁽²⁾, à des développements en série :

$$\begin{aligned} \cosh \sqrt{ZY} &= 1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \dots \\ \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} &= 1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \dots \end{aligned}$$

qui permettent une approximation indéfinie et qu'il est presque toujours possible de limiter aux deuxièmes termes.

» La convergence de ces séries peut s'apprécier rapidement, grâce à cette remarque que le module de $\sqrt{ZY}$ est à peu près égal au rapport de la longueur de la ligne à la longueur d'onde divisée par 2π , ou distance pour laquelle la phase d'une onde varie d'un radian, soit grossièrement 1 000 km à la fréquence 50 p/s ⁽³⁾.

(1) A. BLONDEL. *Revue générale de l'Electricité*, t. VIII, n° 5, 6, 7, 8.

(2) A. BLONDEL. *La Lumière électrique*, 9 mai 1908, t. II, 2^e Série, n° 19, et 1910, n° 38, 39, 44 et 52.

(3) En effet, mod. $\sqrt{ZY} = \omega \sqrt{LC} = \omega \sqrt{lc} \cdot x = \frac{2\pi}{VT} \cdot x$ en appelant x , la longueur de la ligne : T , la période et V , la vitesse de propagation.

» Ainsi, pour une ligne même de 500 km :

$$Z^2 Y^2 = (0,5)^2 = 0,06 \text{ et } \frac{Z^2 Y^2}{24} = 0,25 \text{ pour } 100,$$

tandis que les termes suivants sont tout à fait négligeables.

» Cette forme par développement en série offre le grand avantage de prolonger naturellement, en la généralisant, la forme élémentaire bien connue pour les lignes courtes, de sorte que la même méthode de calcul convient pour toutes les lignes, et que l'on n'est pas exposé, comme avec d'autres méthodes, à l'embaras du choix à faire dans les cas de transition.

» Au point de vue pratique, elle est, d'ailleurs, quoique rigoureuse, d'un emploi plus simple que les méthodes approchées dites **en T** ou **en II**, consistant à remplacer la **capacité répartie** par des condensateurs dérivés au milieu ou aux deux extrémités de la ligne, et dont l'inconvénient est, outre un peu d'arbitraire, de faire intervenir, dans le calcul, des quantités auxiliaires, courants ou tensions, étrangères au problème posé.

» Les expressions ci-dessus se rapportent à la ligne seule supposée homogène. Si l'on veut déterminer la chute de tension entre les bornes de l'alternateur et le réseau à basse tension de distribution, on doit encore tenir compte de l'impédance des transformateurs intercalés aux deux extrémités ; ceci peut se faire suivant un procédé indiqué par F.-W. Peek, en comprenant simplement cette impédance dans celle de la ligne ⁽¹⁾ ; mais si cette méthode sommaire est suffisamment approchée pour les lignes pas trop longues, à condition de faire intervenir à la fois les deux transformateurs au départ et à l'arrivée, les réserves que comporte son emploi sont souvent perdues de vue, ce qui conduit à une application erronée, de sorte que cette méthode nous paraît en définitive devoir être rejetée.

» La solution correcte consiste à écrire les relations entre les tension et courant U_0, I_0 au primaire du transformateur élévateur, et les quantités analogues U_1, I_1 au secondaire :

$$\begin{cases} U_0 = U_1 + Z_0 I_1, \\ I_0 = I_1, \end{cases} \quad (2)$$

au rapport de transformation près, et à faire de même à l'arrivée,

$$\begin{cases} U_1 = U_2 - Z_1 I_2, \\ I_1 = I_2, \end{cases} \quad (3)$$

(1) F.-W. PEEK, *General Electric Review*, juin 1913.

enfin, à éliminer les quantités intermédiaires U_0, I_0, I'_1, I_1 entre ces trois systèmes d'équations pour obtenir la relation reliant U'_0, I_0 à U''_1, I_1 mais qu'il est inutile de reproduire ici.

» Il serait même possible ainsi de tenir compte du courant magnétisant, des pertes dans le fer, des capacités entre bobinages... etc., en en représentant l'effet dans un schéma équivalent par une admittance convenable dérivée (¹), si le courant magnétisant n'était, du fait de la saturation, loin d'être proportionnel à la tension.

» Mais la conception moderne des usines génératrices conduit de plus en plus à considérer l'ensemble d'un alternateur et du transformateur correspondant comme formant un groupe indivisible dans lequel le réglage de la tension au primaire ne présente aucun intérêt particulier, tandis qu'on doit se proposer, plus généralement, de maintenir la tension au départ de la ligne, soit constante, soit au contraire croissant avec la charge, si de l'énergie est empruntée à la ligne de transmission dans le voisinage de la centrale. Dans ce dernier cas, on s'assure aisément que, si les facteurs de puissance aux points de branchement sont les mêmes, tout se passe approximativement, sauf un relèvement général des tensions le long de la ligne à mesure que la charge d'ensemble des réseaux de distribution croît, comme si les transformateurs n'existaient pas.

» D'autre part, il est de plus en plus rare que les lignes doivent former une transmission isolée sans distribution en cours de route, tandis qu'elles sont presque toujours destinées à constituer ultérieurement un tronçon d'un grand réseau d'interconnexion entièrement bouclé.

» Le problème du réglage sur les barres à basse tension en plus de deux centres de production et de distribution devient alors d'une extrême complication, et tous les procédés proposés ci-dessus, pour tenir compte des transformateurs, cessent d'être applicables.

» Enfin, ces artifices présentent l'inconvénient de substituer aux constantes naturelles de la ligne des quantités fictives, sans signification concrète et prêtant à méprises, tandis qu'ils font perdre de vue, notamment à vide, l'état réel des tensions le long de la ligne.

(¹) On trouvera dans R.-D. EVANS ; *Transmission line and Transformers. The Electric Journal*, 1921, t. XVIII, p. 356, un tableau très complet des diverses relations rigoureuses ou approchées, auxquelles on peut recourir dans cet ordre d'idées.

» Dans tous les cas, que l'on fasse intervenir la ligne seule, ou la ligne combinée avec un ou deux transformateurs, et si grande que soit la complexité du réseau de résistances, inductances, capacités que représente la transmission, on aboutira toujours à deux relations linéaires de la forme :

$$\begin{cases} U_o = AU_1 + BI_1, \\ I_o = CU_1 + DI_1, \end{cases} \quad (4)$$

où les coefficients complexes A, B, C, D , sont assujettis à la relation tout à fait générale (1)

$$AD - BC = 1 \quad (5)$$

souvent oubliée, quoique bien connue des télégraphistes (Heaviside, Pupin, Breisig... etc.), et que l'on obtient en appliquant au réseau le théorème de réciprocité de Maxwell ; ce dernier exige que si l'on tire de (4), U_1 et I_1 en fonction de U_o et I_o

$$\begin{cases} U_o = -DU_o - BI_o, \\ I_1 = -CU_o + AI_o. \end{cases} \quad (6)$$

le coefficient de I_o dans U_1 soit égal au coefficient de I_1 dans U_o (au signe près à cause de la convention particulière de sens qui différencie le départ et l'arrivée). Cette relation (5) permet ainsi d'éliminer un des 4 coefficients A, B, C, D ; les auteurs américains (Dwight, Transmission Line Formulas) conservent dans leurs études les trois coefficients A, B, C (avec les mêmes notations), tandis qu'il semble préférable de s'en tenir à A, B, D , car, non seulement le détail des calculs y montre un avantage, mais toutes les fois que le système est symétrique (transformateurs élévateur et abaisseur interchangeables) $A = D$, ce qui réduit à 2 le nombre des coefficients distincts.

» La première des équations (4) représente la tension à l'usine génératrice, U_o , comme résultant de la superposition de la tension à vide AU_1 et de la chute de tension BI_1 , due au courant I_1 (théorème de Blondel) (fig. 1).

» Pour une tension à l'arrivée constante, U_1 , l'extrémité O_1 du vecteur AU_1 est un pôle fixe dont la distance à l'extrémité M de U_o égale à BI_1 , est proportionnelle au courant I_1 à l'arrivée, à une échelle représentée par le module de l'impédance B et avec un angle de rotation constant égal à l'argument de B .

(1) Cette relation se réduit, dans le cas particulier d'une ligne simple, à l'identité :

$$\cos h^2 \sqrt{ZY} - \sin h^2 \sqrt{ZY} = 1$$

signalée par M. Thielemans, dans son étude « Calculs, diagrammes et régulation des lignes de transmissions d'énergie à longue distance », *Revue générale de l'Electricité*, 9 octobre 1920, t. VIII, p. 475.

» On tire ainsi de (4) et (7) :

$$I_0 = \frac{D}{B} U_0 - \frac{U_1}{B},$$

$$I_1 = \frac{U_0}{B} - \frac{A U_1}{B}.$$

» Les puissances en un point s'obtiennent en formant le produit par I de la conjuguée de U que nous désignerons par $\hat{U}$, puis en séparant les parties réelle et imaginaire qui sont respectivement la puissance active P et la puissance réactive Q ⁽¹⁾ :

$$\mathfrak{E} = UI = P - jQ.$$

Ainsi les puissances complexes au départ et à l'arrivée ont pour valeur :

$$\mathfrak{E}_0 = \hat{U}_0 I_0 = \frac{\bar{U}_0^2 \hat{B} D}{\bar{B}^2} - \frac{\hat{U}_0 U_1 \hat{B}}{\bar{B}^2}, \quad (7 \text{ bis})$$

$$\mathfrak{E}_1 = \hat{U}_1 I_1 = \frac{U_0 \hat{U}_1 \hat{B}}{\bar{B}^2} - \frac{U_1^2 \hat{B} A}{\bar{B}^2},$$

en désignant par $\bar{U}_0, \bar{B}^2 \dots$ etc., le carré du module de $U_0, B \dots$ etc. ou, en posant :

$$U_0 = u_0 + j u'_0 \quad U_1 = u_1 \quad (u'_1 = 0)$$

$$\hat{U}_0 = u_0 - j u'_0 \quad A = a + j a' \dots \dots \dots \text{etc.}$$

$$\bar{B}^2 \mathfrak{E}_0 = \bar{U}_0^2 (b - j b') (d - j d') - (u_0 - j u'_0) u_1 (b - j b'),$$

$$\bar{B}^2 \mathfrak{E}_1 = u_1 (u_0 + j u'_0) (b - j b') - \bar{U}_1^2 (b - j b') (a + j a').$$

» D'où en séparant les parties réelle et imaginaire, ce qui ne laisse plus subsister que des quantités scalaires :

$$\begin{aligned} \bar{B}^2 P_0 &= (bd + b' d') \bar{U}_0^2 - b u_0 u_1 + b' u'_0 u_1, \\ \bar{B}^2 Q_0 &= (db' - bd') \bar{U}_0^2 - b' u_0 u_1 - b u'_0 u_1, \\ \bar{B}^2 P_1 &= b u_0 u_1 + b' u'_0 u_1 - (ab + a' b') \bar{U}_1^2, \\ \bar{B}^2 Q_1 &= b' u_0 u_1 - b u'_0 u_1 - (ab' - ba') \bar{U}_1^2. \end{aligned} \quad (8)$$

» Les équations (7 bis) peuvent encore s'écrire sous la forme très simple :

$$\hat{U}_0 U_1 = B \mathfrak{E}_1 + A \bar{U}_1^2,$$

$$\hat{U}_0 U_1 = B \mathfrak{E}_0 + D \bar{U}_0^2,$$

⁽¹⁾ Nous avons choisi pour la puissance complexe P , l'expression $\hat{U}I = P - jQ$ plutôt que $\hat{U}I = P + jQ$, afin d'en conformer la représentation graphique donnée plus loin (diagramme de Dwight) à la convention adoptée par la Commission électrotechnique internationale pour l'orientation des diagrammes de courant rapportés à une même tension origine.

ou, en séparant les parties réelle et imaginaire :

$$\begin{aligned} u_0 u_1 &= bP_1 + b'Q_1 + a \bar{U}_1^2 = -bP_0 - b'Q_0 + d \bar{U}_0^2, \\ u'_0 u_1 &= b'P_1 - bQ_1 + a' \bar{U}_1^2 = b'P_0 - bQ_0 - d' \bar{U}_0^2, \end{aligned} \quad (7 \text{ ter})$$

» Les pertes ont pour valeur :

$$\begin{aligned} P_0 - P_1 &= \left[\left(u_0 - \frac{u_1 b}{bd + b'd'} \right)^2 + u'^2_0 \right] \frac{bd + b'd'}{b^2 + b'^2} \\ &\quad + u_1^2 \left[\frac{ab + a'b' - \frac{b^2}{bd + b'd'}}{b^2 + b'^2} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

» Le minimum des pertes pour une tension constante u_1 à l'arrivée correspond à :

$$u'_0 = 0 \text{ et } u_0 = u_1 \frac{b}{bd + b'd'} \quad (1)$$

c'est-à-dire, à un point placé sur le vecteur de la tension à l'arrivée, et a pour valeur :

$$\text{pertes minima} = \bar{U}_1^2 \frac{\left[(ab + a'b') - \frac{b^2}{bd + b'd'} \right]}{b^2 + b'^2}, \quad (10)$$

tandis que la puissance au départ P_0 s'annule d'après (8), de sorte qu'à ce régime la puissance correspondant aux pertes minima est tout entière fournie par la station réceptrice.

» A tout autre régime, d'après (9), les pertes s'obtiennent en ajoutant aux pertes minima le carré de la distance M N du diagramme exprimée en volts, multiplié par la quantité :

$$\frac{bd + b'd'}{b^2 + b'^2},$$

qui n'est autre que la conductance, ou la partie réelle de l'admittance $\frac{D}{B}$ de la ligne en court-circuit.

» L'application de la proposition qui précède se simplifie à l'extrême dans la presque totalité des cas de la pratique, car, à moins que la ligne ne soit très longue (plus de 400 km), le point N se confond sensiblement avec le point U_1 , la quantité $bd + b'd'$ avec la résistance R de la ligne, et les pertes minima, en général très faibles, avec le douzième des pertes Joule dues au courant de capacité supposé traverser la ligne d'un bout à l'autre.

(1) Si $A = D$, c'est-à-dire si le système est symétrique, ce qui est le cas le plus fréquent, l'axe O_1Q_1 des puissances réactives à l'arrivée coupe OU_1 en un point T qui, avec N, divise harmoniquement OU_1 , c'est-à-dire $ON \cdot CT = \bar{T}_1^2$.

» Lorsque l'on s'est donné, ou que l'on a déterminé la tension au départ U_0 et les pertes P_0, P_1 , on déduit aisément des autres quantités connues la puissance réactive au départ Q_0 , par l'une ou l'autre des deux relations scalaires suivantes, également simples et suggestives, tirées de :7 ter):

$$\begin{cases} Q_0 + Q_1 = \frac{a}{b} (U_0 + U_1) (U_0 - U_1) - \frac{b}{b'} (P_0 + P_1), \\ Q_0 - Q_1 = -\frac{a'}{b} (U_0^2 + U_1^2) + \frac{b'}{b} (P_0 - P_1) \end{cases} \quad (11)$$

et qui déterminent, respectivement, la moyenne de la puissance réactive transmise, ou la consommation de puissance réactive de la ligne en fonction des grandeurs analogues actives et des tensions aux deux extrémités. La première est d'ailleurs d'un emploi préférable au point de vue numérique.

» Ce qui précède suffit à calculer tous les éléments du fonctionnement qui sont d'un intérêt pratique, la tension au départ U_0 , les pertes, d'où la puissance P_0 , enfin la puissance réactive Q_0 ou le déphasage φ_0 .

» Les expressions (8) permettraient de retrouver facilement les propriétés indiquées par M. Thielemans pour les lieux géométriques d'égale puissance P_0 , mais, outre que la détermination directe des pertes est préférable au point de vue numérique, les cercles correspondants sont beaucoup plus faciles à tracer que les cercles d'égale puissance dont le centre est toujours fort en dehors de la partie utile au diagramme (¹). Les cercles d'égale puissance réactive Q_0 , sans être davantage nécessaires, sont néanmoins plus intéressants à considérer, car ils fournissent directement une grandeur importante et dispensent du calcul du déphasage φ_0 au départ.

» Les coordonnées du centre commun de ces cercles ont pour valeur :

$$u_0 = \frac{b' u_1}{2 (ab' - bd')} \quad u'_0 = \frac{b u_1}{2 (db' - bd')}$$

» On déduirait aussi facilement et par voie graphique des droites

(¹) Les coordonnées de ce centre sont :

$$u_0 = \frac{b u_1}{2 (bd + b' d')} \quad u'_0 = \frac{-b' u_1}{2 (bd + b' d')},$$

et la puissance correspondante, maximum de la puissance pouvant être transmise à l'extrémité zéro, avec la tension U_1 au départ

$$P_{0m} = -\frac{U_1^2}{4 (bd + b' d')}.$$

d'égale puissance P_1 et des cercles d'égales pertes, les lieux géométriques d'égale rendement qui sont (Blondel, Thielemans) des cercles ayant même axe radical et dont les centres sont alignés sur la droite NN' de puissance réactive constante passant par N , qui est le lieu des points de rendement maximum; mais la considération directe du rendement est, en général, moins intéressante que celle des pertes aux différentes charges, et notamment de leur valeur moyenne annuelle en partant d'un diagramme d'utilisation déterminé.

EXPRESSION SCALAIRE DES TENSIONS ET PUISSANCES AU DÉPART
EN FONCTION DES GRANDEURS CORRESPONDANTES À L'ARRIVÉE.

» Nous avons adopté dans ce qui précède les tensions au départ et à l'arrivée comme variables, afin de donner une forme symétrique et aussi simple que possible aux expressions des puissances active et réactive, par exemple. Ce choix offre, en outre, l'avantage de ramener immédiatement le calcul d'un réseau, si complexe soit-il, à celui des divers tronçons de ligne qui le composent, dès l'instant que l'on se donne les valeurs en grandeur et en phase des tensions aux différents nœuds.

» Si, par contre, on prend comme d'habitude pour données les grandeurs caractéristiques du fonctionnement à l'arrivée, on peut obtenir sous forme scalaire les grandeurs correspondantes au départ, en substituant aux relations vectorielles (4) celles qui s'en déduisent en les multipliant par leurs conjuguées.

» Les produits $\hat{U}U$, $\hat{I}I$ et $\hat{U}I$ donnent, en effet, respectivement le carré de la tension, le carré du courant, enfin, en séparant les parties réelle et imaginaire, la puissance active et la puissance réactive.

$$\begin{aligned} U_o^2 &= (a^2 + a'^2) U_1^2 + (b^2 + b'^2) I_1^2 + 2(ab + a'b')P_1 + 2(ab' - ba')Q_1 \\ I_o^2 &= (c^2 + c'^2) U_1^2 + (d^2 + d'^2) I_1^2 + 2(cd + c'd')P_1 + 2(cd' - dc')Q_1 \\ P_o &= (ac + a'c') U_1^2 + (bd + b'd') I_1^2 + (bc + b'c' + ad + a'd')P_1 \\ &\quad - (bc' - cb' - ad' + da')Q_1 \\ Q_o &= (ac' + ca') U_1^2 - (bd' - db') I_1^2 - (bc' - cb' + ad' - da')P_1 \\ &\quad + (-bc - b'c' + ad + a'd')Q_1 \end{aligned}$$

» Ces expressions ne sont autres que celles que M. Boucherot a déduites directement, par application du théorème de la conser-

vation des puissances active et réactive, des équations différentielles du courant et de la tension ⁽¹⁾.

Si elles offrent l'avantage de ne contenir que des quantités réelles, l'intervention des carrés du courant et de la tension alourdit le calcul numérique de puissances de 10 élevées, et obscurcit un peu le sens concret de ces quantités.

» En outre, les quatre grandeurs U^2 , I^2 , P , Q , que la symétrie des équations contraint à considérer à la fois, ne sont pas indépendantes, mais liées par la relation $U^2 I^2 = P^2 + Q^2$, de sorte que le calcul de la tension à l'arrivée en fonction de la charge au même point et de la tension au départ, ou celui de la puissance réactive à l'arrivée en fonction des tensions et de la puissance active, exigent la solution d'une équation du 2^e degré, dont une seule racine est pratiquement à retenir.

» Aussi, bien que ces relations scalaires ne soient en somme que la traduction analytique du diagramme, nous leur préférons l'emploi direct de ce dernier qui, tout en étant d'une construction aisée, permet d'embrasser d'un coup d'œil l'ensemble de la solution, et enfin, ne dépouillant pas de leur caractère vectoriel les grandeurs courant et tension auxquelles la notion de phase est si intimement attachée, respecte en somme mieux la nature physique du problème.

» APPLICATION NUMÉRIQUE. — L'exemple ci-dessous montrera que l'application de ce qui précède ne comporte que des calculs et des constructions graphiques très simples.

» Supposons que la distance de transmission soit de 200 km et que la ligne, établie pour une tension à l'arrivée de 150 kv, soit composée de 3 conducteurs en câble mixte en aluminium-acier, à 37 brins de 3,5 mm de diamètre, d'une section utile (aluminium) de 288 mm² et d'un diamètre total de 2,45 cm. La résistance linéique de ce conducteur sera, en négligeant la conductibilité de l'âme en acier à 7 brins, suivant une hypothèse courante qui tient compte, dans une certaine mesure, de l'augmentation de résis-

⁽¹⁾ La complication du calcul direct résulte de ce que, tandis que les quantités complexes U et I sont données par une équation différentielle du second ordre, les quantités réelles P , Q , U^2 et I^2 résultent d'une équation du quatrième ordre (bicarrée) ; l'intégration introduit donc pour chaque inconnue 4 constantes arbitraires dont l'élimination et le remplacement par les quantités données à l'arrivée est pénible.

tance due à l'effet Kelvin, et que des expériences récentes ont assez bien vérifiée :

$$r = \frac{31,5}{288} = 0,1094 \text{ ohm : kilomètre}$$

Supposons que l'écartement équivalent des conducteurs soit de 3,80 m ⁽¹⁾ (correspondant à un écartement de 3 m entre conducteurs si les 3 phases sont dans le même plan).

» A la fréquence de 50 périodes par seconde, la réactance linéique par phase a pour valeur :

$$\begin{aligned} \omega l &= 314 (4,605 \log \frac{380}{1,225} + 0,5) 10^{-4} \\ &= 0,376 \text{ ohm : kilomètre} \end{aligned}$$

et la susceptance linéique par phase :

$$\omega c = \frac{314}{4,605 \log \frac{380}{1,225}} \frac{1}{9,10^6} = 3,04 \cdot 10^{-6} \text{ mho : kilomètre}$$

en ne tenant pas compte de la capacité par rapport au sol qui n'intervient pas de manière sensible si la somme algébrique des tensions de phase est nulle ; les valeurs correspondantes pour la ligne entière sont en multipliant par sa longueur, 200 km :

$$R = 21,88 \text{ ohms, } X = 75,2 \text{ ohms, } B = 6,08 \cdot 10^{-4} \text{ mhos,}$$

$$Z = (21,88 + j. 75,2) 10^{-3} \text{ kilohms,}$$

$$Y = +j. 6,08 \cdot 10^{-4},$$

$$ZY = -0,045j. 0,0133, \text{ millimhos,}$$

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} + \dots = 0,9772 + j. 0,0066,$$

$$B = Z(1 + \frac{ZY}{6} + \dots) = (21,88 + j. 75,2)(0,9924 + 0,0022) 10^{-3},$$

$$B = (21,55 + j. 74,65) 10^{-3} \text{ kilohms,}$$

$$C = Y(1 + \frac{ZY}{6} + \dots) = j. 6,08 \cdot 10^{-4}(0,9924 + j. 0,0022),$$

$$C = (-0,00134 + j. 0,603) \text{ millimhos.}$$

Nous considérerons, au lieu de la tension simple et du courant par phase, la tension composée et le courant multiplié par $\sqrt{3}$:

⁽¹⁾ Si d_{12} , d_{23} , d_{31} sont les distances mutuelles des 3 conducteurs 2 à 2, l'écartement équivalent dans une disposition équilatérale est de

$$\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}} \text{ ou } \log d_e = \frac{1}{3} (\log d_{12} + \log d_{23} + \log d_{31}).$$

Si les 3 conducteurs sont dans le même plan à l'écartement d ,

$$d_e = d \sqrt[3]{2} = 1,23 \cdot d.$$

les valeurs des résistances, réactances, susceptances... etc, restent les valeurs habituelles, c'est-à-dire celles par phase, tandis que les facteurs 3 et $\sqrt{3}$ s'éliminent de tous les calculs de tensions de puissances, etc... ($P = U \cdot I\sqrt{3}$, $3 RI^2 = R(I\sqrt{3})^2$).

» Cet artifice, employé par divers auteurs étrangers, a l'avantage de faire porter le calcul de préférence sur les quantités mêmes qui expriment les données et les résultats, puissances totales et tensions composées, et, en évitant de faire intervenir aucune grandeur accessoire comme les tensions simples et les puissances par phase, soulage la mémoire et facilite éventuellement le calcul de tête.

» La tension à vide au départ a pour valeur :

$$\begin{aligned} U_0 &= 150 (1 - 0,0228 + j. 0,0066) \text{ kilovolts,} \\ &= 150 - 3,42 + j. 0,99 \text{ kilovolts.} \end{aligned}$$

» L'extrémité du vecteur correspondant a été portée en O_1 sur le diagramme ci-joint (fig. 2) qui porte tracés à l'avance à l'échelle de 5 mm par kilovolt un réseau de cercles ayant pour centre commun en dehors des limites du papier l'origine O des tensions.

» Le courant actif correspondant à une puissance à l'arrivée de 40 000 kilowatts a pour valeur :

(Courant par phase multiplié par $\sqrt{3}$) $I_1 = \frac{40\,000}{150} = 266,6$ ampères
et la chute de tension correspondante si le courant réactif est nul :

$$\begin{aligned} BI_1 &= 266,6 (21,55 + j. 74,65) 10^{-3}, \\ &= 5,75 + j. 19,9 \text{ kilovolts} \end{aligned}$$

de sorte que la tension au départ a pour valeur :

$$U_0 = AU_1 + BI_1 = 152,33 + j. 20,89 \text{ kilovolts.}$$

» L'extrémité de son vecteur représentatif est en M_0 sur le diagramme: $\overline{U_1 M_0} = 103$ mm représente, en grandeur et en direction, la chute de tension BI_1 due à un courant actif $I_1 = 266,6$ ampères ou à une puissance active de 40 000 kilowatts ; comme cette chute de tension est proportionnelle à I_1 , l'échelle correspondante permet de graduer la ligne droite $O_1 M$ en ampères ou mieux en kilowatts de puissance P_1 à l'arrivée, et la droite $O_1 Q_1$ en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur OP_1 , en kilovolts-ampères de puissance réactive Q_1 à l'arrivée, de sorte qu'en construisant le point M qui a pour coordonnées suivant ces deux axes respectivement P_1 et Q_1 , on obtient immédiatement par simple lecture

Supposons ainsi que le lieu des points représentatifs de la charge active et réactive à l'arrivée soit la droite $N_1 M_1$ reliant le point à vide N_1 qui correspond à une puissance réactive de 5 600 kilovolts-ampères au point en charge M_1 qui correspond à une puissance active de 40 000 kilowatts sous un $\cos \varphi$ de 0,9, c'est-à-dire à une puissance réactive de 19 400 kilovolts-ampères. Si cette puissance était directement transmise sur la ligne, on voit que pour maintenir à l'arrivée une tension constante de 150 kilovolts, il faudrait que la tension U_0 au départ variât de 149,4 kilovolts à vide (point N_1) à 162,6 kilovolts en charge (point M_1).

» Le diagramme montre de même immédiatement quelle puissance réactive à l'arrivée il faut ajouter ou retrancher à toute charge pour supprimer la variation de tension, et, dans le cas où cette puissance est produite par un compensateur (ou condensateur) synchrone, quelle est la valeur constante à donner à la tension au départ, qui réalise la meilleure utilisation de cette machine. Ainsi dans le cas où la puissance dont est susceptible sans risque de décrochage la machine fonctionnant sous-excité ou comme réactance, est seulement la moitié de sa puissance normale en régime surexcité, la tension constante à maintenir au départ sera de 154 kilovolts, ce qui partage l'intervalle de réglage du compensateur en $M_1 M = 18\,500$ kilovolts-ampères en charge et $N_1 N = + 9\,000$ kilovolts-ampères à vide.

» La puissance réactive à fournir par la ligne à l'arrivée reste donc égale en charge à :

$$19\,400 - 18\,500 = 900 \text{ kilovolts-ampères}$$

correspondant à un courant réactif de :

$$\frac{900}{150} = 6,0 \text{ ampères,}$$

ce qui donne lieu à une chute de tension supplémentaire :

$$\begin{aligned} B (-j. 8,7) &= (21,55 + j. 74,65) (-j. 6,0) 10^{-3}, \\ &= -j. 0,1 + 0,4 \text{ kilovolts} \end{aligned}$$

et porte la tension résultante en M à :

$$\begin{aligned} U_0 &= 152,7 + j. 20,8 \text{ kilovolts ; d'où} \\ |U_0| &= 154 \text{ kilovolts,} \end{aligned}$$

ce qui confirme la lecture que le diagramme nous avait permis de faire immédiatement.

» A titre de vérification et bien que cette partie du calcul ne

soit pas nécessaire pour la suite, nous calculerons le courant à l'arrivée correspondant :

$$I_0 = CU_1 + DI_1$$

$$I_0 = (-0,00134 + j. 0,603) 150 \\ + (266,6 - j. 6) (0,9772 + j. 0,0066)$$

$$I_0 = 260,4 + j. 86,35 \text{ ampères.}$$

D'où l'on déduit la puissance active au départ :

$$P_0 = u_0 i_0 + u'_0 i'_0 = 152,7 \times 260,4 + 20,8 \times 86,35 = 41\,560 \text{ kilowatts}$$

et la puissance réactive au départ :

$$Q_0 = u'_0 i_0 - u_0 i'_0 = 20,8 \times 260,4 - 152,7 \times 86,35 \\ = 7780 \text{ kilovolts-ampères.}$$

» Si ce calcul direct est suffisant pour la puissance Q_0 , il est préférable, pour éviter que l'erreur commise sur P_0 n'entraîne, sur la différence assez petite $P_0 - P_1$, une erreur relative excessive, d'évaluer directement ces pertes ; ce mode de procéder est, d'ailleurs, non seulement plus exact, mais même plus expéditif, si, comme il arrive généralement, on doit calculer les pertes pour plusieurs régimes différents afin d'évaluer la perte moyenne annuelle suivant un diagramme d'utilisation déterminé. On est, d'autre part, conduit ainsi directement à la détermination sur le diagramme de la ligne de rendement maximum, et du point de rendement maximum maximorum, pour une tension U_1 donnée à l'arrivée.

» Les pertes minima ont pour valeur exacte :

$$\left[\frac{ab + a'b'}{b^2 + b'^2} - \frac{b^2}{(b^2 + b'^2)(bd + b'a')} \right] U_1^2,$$

mais, comme il s'agit presque toujours de valeurs si petites qu'elles en sont presque négligeables, on peut se contenter de l'évaluation approchée :

$$\text{pertes minima} = \frac{RH \cdot U_1^2}{12} = \frac{1}{3} R \left(\frac{HU_1}{2} \right)^2$$

qui les représente comme dues au courant de capacité fourni également par les deux extrémités et se distribuant linéairement le long de la ligne, suivant une hypothèse suffisante tant que la longueur de la ligne est très inférieure à une demi-onde (fig. 3).

» Dans le cas présent, ces pertes ont pour valeur :

$$\text{pertes minima} \approx \frac{1}{12} 21,8 \times 90^2 = 13 \text{ kilowatts.}$$

» La position du point de pertes minima correspond à U_0 en phase avec U_1 et égal à :

$$U_0 = \frac{b}{b'd'} \frac{b}{b'd} U_1.$$

» Or, on démontre aisément en développant en série, que :

$$\frac{b}{b'd} + \frac{b}{b'd'} = 1 - \frac{\bar{Z}^2 H^2}{24} + \dots$$

et, en supposant l'amortissement faible, que $\sqrt{ZY}$ ou $j\sqrt{XH}$ représente l'angle dont la phase d'une onde à 50 périodes par seconde retarde du départ à l'arrivée ; la longueur de ligne correspondant à un radian est de $\frac{6000}{2\pi} \approx 1\,000$ km, de sorte qu'à 50 périodes par seconde $\bar{Z}^2 H^2$ est très sensiblement égal à la

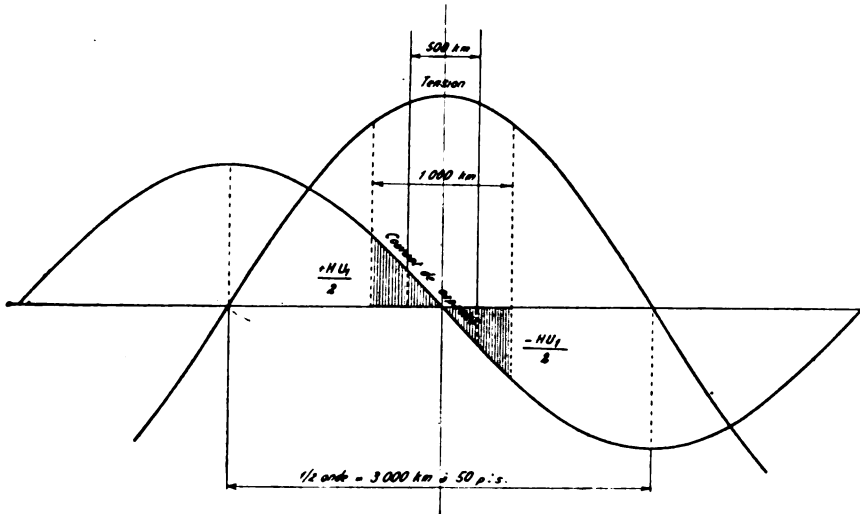


Fig. 3. — Régime du courant et de la tension le long d'une ligne à vide alimentée en puissance réactive à ses deux extrémités d'une manière symétrique (cas de la mise sous tension avec compensateur synchrone à l'arrivée). Même pour une longueur de 1 000 km d'une fréquence de 50 p.s, la distribution du courant de capacité est encore très sensiblement linéaire.

4^e puissance du rapport de la longueur actuelle de la ligne à 1 000 km :

$$1 - \frac{\bar{Z}^2 H^2}{24} \approx 1 - \frac{1}{24} \left(\frac{200}{1\,000} \right)^2 = 1 - 0,000\,066 = 1.$$

» Ainsi, à moins que la ligne ne soit extrêmement longue (500 km), on pourra toujours confondre le point de pertes minima avec l'extrémité du vecteur U_1 , à un haut degré d'approximation.

» Les pertes à un régime quelconque représenté par le point M sur le diagramme s'obtiendront simplement en ajoutant, aux pertes minima calculées ci-dessus, le produit du carré du vecteur $U_1 M$ mesuré à l'échelle des tensions ($U_1 M = 20,8$ kilovolts) par la conductance (*) :

$$\frac{b d + b' d'}{b^2 + b'^2} = \frac{b}{b^2 + b'^2} = \frac{21,55}{5992} = 0,003595 \text{ ohms}$$

ou 3,595 milliohms,

de sorte que les pertes à la charge de 40 000 kilowatts représentée par le point M sont :

$$P_0 - P_1 = 13 + 20,8^2 \times 3,595 = 1570 \text{ kilowatts,}$$

valeur à peine différente de celle calculée directement.

» Le lieu des points de rendement maximum est la parallèle à $O_1 P_1$ menée par le point U_1 et correspondant à une puissance réactive Q_1 absorbée constante (mesurée sur le diagramme) de 7 350 kilovolts-ampères: le long de cette droite, la partie variable des pertes est sensiblement égale au produit de la résistance R de la ligne par le carré du courant actif ; nous avons vu, d'autre part, que la partie constante, ou minimum des pertes, est égale sensiblement au produit de la même résistance par le carré de la fraction $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ du courant de capacité BU_1 total, ou $\frac{1}{\sqrt{3}}$ du courant réactif $O_1 U_1$ à l'arrivée. Il en résulte, suivant un théorème classique, que le rendement maximum maximum, obtenu pour l'égalité de la partie constante et de la partie variable des pertes, correspond à un courant actif égal à $\frac{1}{\sqrt{3}}$ fois le courant réactif, c'est-à-dire au point R du diagramme pour lequel le facteur de puissance à l'arrivée est 0,5 avec un déphasage en arrière de 60° ; on démontrerait de même que le facteur de puissance correspondant au départ est aussi égal à 0,5, mais avec un déphasage en avant de 60° .

» Ce rendement maximum maximum a pour valeur :

$$\frac{P_1}{P_0} = 1 - \frac{2 \times \sqrt{3} \times 13}{7350} = 99,4 : 100.$$

» Le calcul de Q_0 peut se faire sans nécessiter celui du courant I_0 , et d'une manière à la fois plus sûre et plus simple, au moyen

(*) partie réelle de l'admittance de la ligne mise en court-circuit à l'extrémité.

de la 1^{re} des relations 11, ce qui donne $Q_0 = - 7\,840$ kilovolts-ampères, ne différant du résultat obtenu par I_0 que de 60 kilovolts-ampères, soit à peine 0,15 pour 100 de P .

» Calculons maintenant les conditions de fonctionnement de l'alternateur en supposant que l'ensemble des transformateurs au départ aient une puissance de 50 000 kilovolts-ampères, des pertes dans le fer de 0,8 pour 100, des pertes Joule de 0,8 pour 100 également pour la pleine charge, un courant magnétisant de 5 pour 100 et une réactance à pleine charge de 8 pour 100; les pertes correspondant à la charge d'environ 42 000 kilovolts-ampères (40 000 kilowatts à l'arrivée de la ligne) seront :

$$p_0 = 50\,000 \times \frac{0,8}{100} + 50\,000 \times \frac{0,8}{100} \left(\frac{42}{50}\right)^2 = 680 \text{ kilowatts,}$$

et la consommation de puissance magnétisante :

$$q_0 = 50\,000 \times \frac{5}{100} + 50\,000 \times \frac{8}{100} \left(\frac{42}{50}\right)^2 = 5\,320 \text{ kilovolts-ampères,}$$

ce qui porte les puissances à produire par les alternateurs à :

$$P'_0 = P_0 + p_0 = 41\,570 + 680 = 42\,250 \text{ kilowatts,}$$

$Q'_0 = Q_0 + q_0 = - 7\,840 + 5\,320 = - 2\,500$ kilovolts-ampères, correspondant à un facteur de puissance aux alternateurs :

$$\cos \varphi'_0 = \frac{P'_0}{\sqrt{P'^2_0 + Q'^2_0}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2,5}{42,2}\right)^2 = 0,999,$$

avec un déphasage en avant.

DIAGRAMME DE H.-B. DWIGHT

» Le diagramme dont la construction a été exposée ci-dessous (Blondel, Perrine-Baum) est un diagramme de tensions, en ce sens que les différents vecteurs qui le constituent représentent des tensions mesurées à une même échelle fondamentale : si divers vecteurs peuvent y représenter des courants ou des puissances, c'est à une échelle auxiliaire qu'il faut calculer ou mesurer directement sur le graphique, et dont l'emploi peut paraître moins commode parce que cette échelle, bien qu'uniforme pour une même grandeur, ne s'exprime pas par un nombre simple.

» On doit à H.-B. Dwight, ingénieur à la Société canadienne Westinghouse, une modification de ce diagramme qui, tout en conservant la disposition générale, consiste à prendre pour axes

» Le passage d'un système de référence à l'autre se fait aisément au moyen des équations de transformation (7^{ter}), qui relient linéairement, d'une part, les puissances active P_1 et réactive Q_1 à l'arrivée, d'autre part, les composantes u_o et u'_o de la tension au départ, pour une tension constante U_1 à l'arrivée.

» Ainsi l'origine des tensions a pour coordonnées :

$$P_{10} = -\left(\frac{ab}{b^2} + \frac{a'b'}{b'^2}\right) U_1^2 \quad Q_{10} = -\left(\frac{ab' - ba'}{b^2 + b'^2}\right) U_1^2,$$

valeurs des puissances à l'arrivée qui correspondent, pour une tension U_1 donnée, à la mise en court-circuit de la ligne au départ.

» La puissance apparente correspondante ou distance de l'origine des tensions à l'origine des puissances est :

$$\sqrt{P_{10}^2 + Q_{10}^2} = \sqrt{\frac{a^2 + a'^2}{b^2 + b'^2}} U_1^2.$$

» Le rayon du cercle $U_o = c^te$ a pour valeur :

$$\rho = \frac{U_o U_1}{\sqrt{b^2 + b'^2}}$$

et est naturellement proportionnel à U_o , mais avec une échelle qui dépend non seulement des constantes de la ligne, mais encore de la tension à l'arrivée U_1 .

» Le point de fonctionnement correspondant au minimum de pertes a pour coordonnées :

$$P_{1\mu} = \left[\frac{b^2}{(b^2 + b'^2)(bd + b'd')} - \frac{(ab + a'b')}{b^2 + b'^2} \right] U_1^2 (< 0).$$

$$Q_{1\mu} = \left[\frac{bb'}{(b^2 + b'^2)(bd + b'd')} - \frac{ab' - ba'}{b^2 + b'^2} \right] U_1^2.$$

» Presque toujours, on pourra négliger l'ordonnée P_1 qui représente, au signe près, les pertes minima, et prendre pour valeur approchée de l'abscisse, le produit de la tension U_1 par la moitié du courant de capacité HU_1 correspondant :

$$Q_{1\mu} \approx \frac{1}{2} HU_1^2.$$

» Enfin, les pertes à un régime quelconque représenté par le point M, s'obtiendront en ajoutant aux pertes minima — $P_{1\mu}$ dont l'expression très approchée est $\frac{RH \cdot U_1^2}{12}$, le produit du carré du recteur $U_1 M$, exprimé cette fois en kilowatts, par le quotient :

$$\frac{bd + b'd'}{U_1^2} = \frac{b}{U_1^2},$$

qui représente l'inverse du quadruple de la puissance maximum.

» Dans l'exemple numérique que nous avons étudié, on trouve ainsi pour coordonnées du point origine des tensions :

$$P_{10} = -3,595 \cdot 150^2 = 81\,000 \text{ kilowatts},$$

$$Q_{10} = \frac{72,5 \cdot 10^3}{5\,992} 150^2 = 272\,000 \text{ kilovolts-ampères}.$$

» Le rayon correspondant à une tension de 151 kilovolts au départ a pour valeur :

$$\rho = \frac{154 \times 150 \cdot 10^3}{\sqrt{5\,992}} = 298\,800 \text{ kilovolts-ampères}.$$

» La puissance réactive correspondant au point de pertes minima est :

$$Q_1 = \frac{1}{2} HU_1^2 = \frac{1}{2} 608 \cdot 10^{-3} 150^2 = 6\,830 \text{ kilovolts-ampères}.$$

» On trouve, comme sur le précédent diagramme, que la puissance réactive correspondant à une tension de 151 kilovolts et à une charge de 40 000 kilowatts est 900 kilovolts-ampères, la distance correspondante au point U_1 est :

$$U_1 M = 40\,300 \text{ kilovolts-ampères}$$

et le quadruple de la puissance maximum :

$$\frac{U_1^2}{b^2} = \frac{150^2}{21,55 \cdot 10^{-3}} = 1\,045\,000 \text{ kilowatts}.$$

de sorte que les pertes ont pour valeur :

$$13 + 40\,300 \times \frac{40\,300}{1\,045\,000} = 13 + 1\,555 = 1\,570 \text{ kilowatts},$$

comme il a été déjà calculé par l'autre diagramme.

» Lorsque le point de fonctionnement est voisin de la droite de rendement maximum, le complément à l'unité du rendement est, en négligeant les pertes constantes, égal au rapport de la charge

(40 300 kilowatts) à la puissance $\frac{U_1^2}{b}$ (1 045 000 kilowatts), soit dans le cas présent 3,9 pour 100, c'est-à-dire que le rendement à la charge considérée est de 96,1 pour 100.

» On pourrait calculer, comme précédemment, la charge réactive et le facteur de puissance au départ, mais si l'on fixe la tension au départ en même temps que la tension à l'arrivée, par exemple, $U_0 = 151$ kilovolts pour $U_1 = 150$ kilovolts, il est pos-

sible de tracer sur le même diagramme, en prenant comme nouvelles coordonnées P_0 et Q_0 au lieu de P_1 et Q_1 , un cercle donnant pour ces valeurs déterminées des tensions aux extrémités, la relation qui lie Q_0 à P_0 ; il suffit pour cela d'intervertir dans les expressions ci-dessus U_0 et U_1 et de remplacer P_1 , Q_1 , P_0 , Q_0 par $-P_0$, $-Q_0$, $-P_1$, $-Q_1$.

» Le centre O' de ce cercle se trouve sur la droite OO_1 , mais du côté opposé à O , et son rayon pour deux valeurs déterminées de U_0 et U_1 est le même que celui du cercle O correspondant aux deux mêmes valeurs des tensions.

» Ayant déterminé par le calcul des pertes la puissance P_0 au départ, qui correspond à une charge P_1 à l'arrivée, il suffit de prendre sur le cercle O' le point d'ordonnée P_0 pour obtenir directement le déphasage correspondant φ_0 et la charge réactive Q_0 mesurée sur l'axe des abscisses. La projection horizontale de $M'M$ représente le gain de puissance réactive dû à l'excès de l'influence de la capacité de la ligne sur celle due à sa réactance.

» Le diagramme ci-contre (fig.5), d'un emploi courant à la Westinghouse Electric and Mfg C^o, présente cet avantage que les mesures de puissance y sont particulièrement simples en raison du choix de l'échelle : d'autre part, la position du point figuratif du régime de la ligne à l'arrivée n'y dépend pas de la tension, pour laquelle on peut choisir plusieurs valeurs différentes tout en conservant une grande partie du diagramme.

» Par contre, si, en adoptant du papier quadrillé, on peut se dispenser d'avoir à graduer les deux axes de coordonnées qui donnent les puissances à l'arrivée, il reste chaque fois à calculer l'échelle des tensions et à construire des cercles d'assez grand rayon si l'on veut ne faire tenir dans un format commode que la partie utile du diagramme.

» On peut éviter, pour le tracé de ces cercles, l'emploi du compas à verge, si l'on effectue les constructions sur papier calque, ce qui permet des reproductions du diagramme par simple tirage, à condition d'avoir tracé à l'avance, sur une feuille servant de support, une série d'arcs de cercle de rayons croissants par échelons et suffisamment voisins (1 : 100 du rayon, par exemple) pour que l'on puisse négliger dans l'étendue utilisée la différence de courbure de l'un à l'autre ; il suffit dès lors, ayant construit la ligne des centres, de calculer, outre le rayon du cercle correspondant aux tensions U_0 et U_1 , la position de son inter-

section avec la ligne des centres OO_1O' , pour être en mesure de relever par transparence la portion utile de ce cercle.

CONCLUSION

» Si l'exposé ci-dessus des deux méthodes que nous avons retenues comme préférables au point de vue de leur emploi pratique, a pu paraître assez long, parce que nous avons tenu à en montrer les différents aspects, ainsi que les points de contact avec les autres méthodes de calcul des lignes, leur application à un cas concret ne comporte qu'un très petit nombre de calculs, comme on peut en juger par les feuilles ci-dessous, où se trouvent indiquées dans leur ordre naturel les opérations qu'il est nécessaire et suffisant d'effectuer pour aboutir à la solution complète, c'est-à-dire au diagramme.

» Si le diagramme de tensions (Blondel) semble préférable pour l'étude d'une ligne de longueur variable, ou lorsque l'on désire se rendre compte du régime exact des tensions tout le long de la ligne, le diagramme des puissances ou de H.-B. Dwight, grâce à sa constitution symétrique, a l'avantage de donner du régime au départ une représentation immédiate, semblable à celle du régime à l'arrivée.

» Le choix entre les deux méthodes qui ne présentent d'ailleurs, comme nous l'avons vu, que des différences secondaires, reste ainsi une question d'espèce ou de préférence, qui ne saurait être tranchée d'une manière absolue.

FEUILLE DE CALCULS

» Ligne de à N°.....

» Longueur : 1 200 km (en 3 tronçons de 400 km).

» Puissance transmise par circuit triphasé : 50 000 kw.

» Fréquence : 50 p.s.

» *Choix de la tension.* — Tension minimum (correspondant au régime sans déphasage et à une valeur moyenne de 400 ohms pour l'impédance caractéristique) :

$$U \geq \sqrt{0,4 P} = \sqrt{0,4 \times 50\,000} = 141 \text{ kv.}$$

» Valeur normale adoptée : 220 kv (plutôt que 150 kv en raison de la grande distance de transmission).

» *Choix de la section.* — Règle de lord Kelvin :

σ , densité en ampères par millimètre carré, correspondant à la valeur moyenne quadratique annuelle du courant sur la ligne ;

$\rho \propto \alpha$, charges annuelles (intérêt et amortissement) en francs

pour 1 kg de conducteur : $10 \text{ fr} \times \frac{10}{100} = 1 \text{ fr.}$

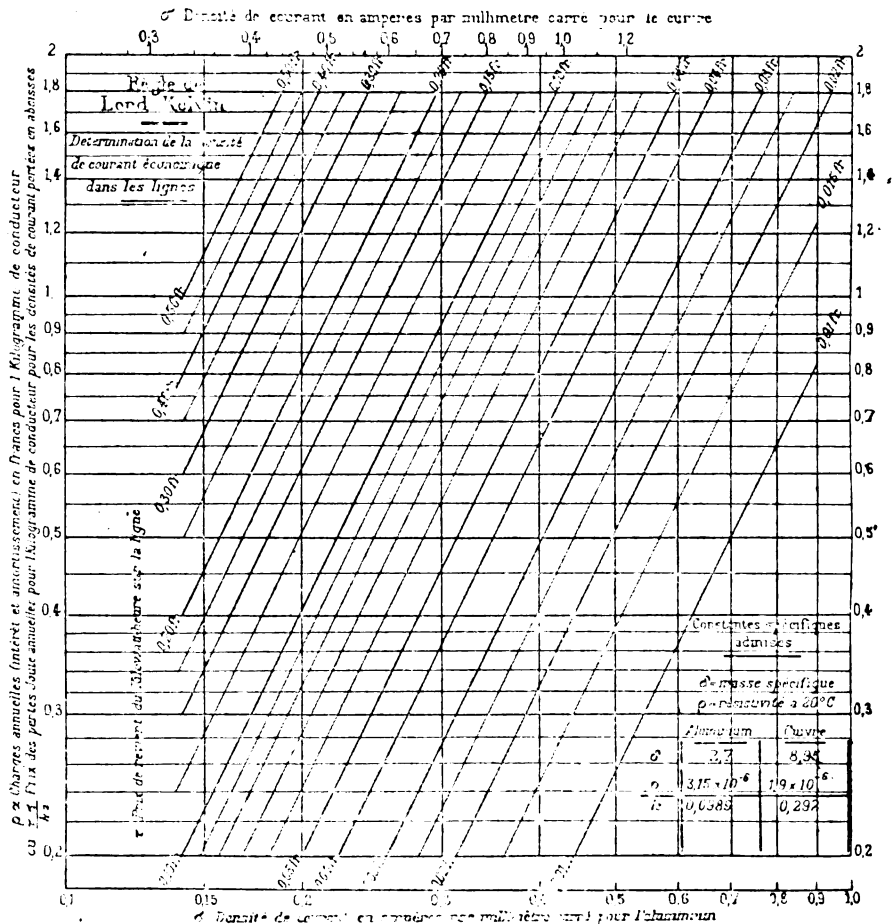


Fig. 6. — Détermination de la densité du courant économique par la règle de lord kelvin ($\sigma = k \sqrt{\frac{\rho \alpha}{\tau}}$).

τ , prix de revient en francs du kilowatt-heure sur la ligne : 0,10 fr.

Pour le cuivre : $\sigma = 0,29 \sqrt{\frac{\rho \alpha}{\tau}}$.

Pour l'aluminium : $\sigma = 0,1 \sqrt{\frac{\rho \alpha}{\tau}} = 0,31$.

(se servir de l'abaque de la figure 6).

» Puissance apparente moyenne quadratique annuelle par ligne (tenir compte du coefficient d'utilisation et de la puissance réactive) : 40 000 kv-A.

» Courant moyen correspondant : $\frac{40\ 000}{220 \sqrt{3}} = 105\text{ A.}$

» Section : $\frac{105}{0,31} = 338\text{ mm}^2.$

» Conducteur normal adopté :

mixte Aluminium à âme d'acier à 37 brins,

Aluminium 30 brins 343 mm²,

Acier 7 brins 80 mm².

» Calcul des constantes de la ligne. — Diamètre, $2r = 2,68\text{ cm.}$

» Arrangement des conducteurs $\begin{matrix} 4,76\text{ m} & 4,76\text{ m} \\ 1 & 2 & 3 \end{matrix}$

» Espacement équilatéral équivalent :

$$D = \sqrt[3]{d_{12} d_{22} d_{31}} = d \sqrt[3]{2} = 4,76 \times 1,26 = 6\text{ m.}$$

» Constantes linéiques :

$$r, \text{ résistance} \begin{cases} \text{Pour le cuivre } r = \frac{19^{(1)}}{S} \\ \text{Pour l'aluminium } r = \frac{31,5}{S} = \frac{31,5}{343} = 0,0918\text{ ohm : km.} \end{cases}$$

$$\omega L, \text{ réactance} = 314 \times \left[4,6 \log_{10} \frac{D}{r} - \frac{1}{2} \right] 10^{-4} = 0,399\text{ ohm : km.}$$

$$\omega C, \text{ susceptance} = \frac{314}{4,6 \log_{10} \frac{D}{r}} \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} = 2,861 \cdot 10^{-6}\text{ mho : km.}$$

(se servir de l'abaque de la figure 7) (2)

(1) En majorant de 5 pour 100 pour flèches, épissures, etc...

(2) Le terme $\frac{1}{2}$ dans l'expression de la réactance qui correspond au champ intérieur, peut être supprimé à condition de remplacer en dénominateur du logarithme, r rayon extérieur du conducteur, par $0,779 r$ rayon moyen ou moyenne distance géométrique de tous les couples de points de la section pris 2 à 2 (Maxwell) ; les réactances des câbles à 7, 19, 37 brins et 61 brins correspondent de même, en toute rigueur, à des

	7	19	37	61	∞ brins
rayons moyens	$0,728 r$	$0,758 r$	$0,763 r$	$0,773 r$	$0,779 r$
ou à des termes correctifs	0,635	0,556	0,528	0,516	0,5

dont la différence avec 0,5 (cas de la section circulaire) est en général pratiquement négligeable.

» Constantes pour la ligne homogène entière (de 400 km) :

$$\begin{aligned} R &= 0,0918 \times 400 = 36,72 && \text{ohms} \\ X &= 0,399 \times 400 = 159,6 && \text{ohms} \\ H &= 2,861 \times 10^{-6} \times 400 = 1,144 \cdot 10^{-3} && \text{mho} \end{aligned}$$

» Inclinaison de la ligne des centres OO' sur l'axe OQ :

$$\begin{aligned} \lg X &= \frac{ab + a'b'}{ab - b'a'} = \frac{R}{X} \left(1 - \frac{R^2}{3} - \frac{X^2 R}{X} - 2 \frac{(R^2 + X^2) H^2}{30} \dots \right) \\ &= \frac{36,72}{159,6} (1 - 0,064 - 0,002 \dots) = 0,2445. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |A| &= \sqrt{a^2 + a'^2} = 1 - \frac{XH}{2} - \frac{(2R^2 + X^2)H^2}{24} \\ &= 1 - 0,091 - 0,001 = 0,908. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |B| &= \sqrt{b^2 + b'^2} = R^2 + X^2 \left(1 - \frac{XH}{6} + \frac{R^2 H^2}{180} + \frac{X^2 H^2}{120} \dots \right) \\ &= 164(1 - 0,030) = 159 \text{ ohms}. \end{aligned}$$

» Puissance apparente en court-circuit pour différentes tensions à l'autre extrémité (distance OO_1 du diagramme) :

$$\begin{aligned} \text{Pour } 225 \text{ kv, } \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + \frac{a'^2}{b'^2}} U_1 &= \frac{0,910}{0,159} 215^2 = 290\,000 \text{ kVA;} \\ 220 \text{ kv, } \dots\dots\dots \sqrt{220^2} &= 277\,000 \text{ kVA.} \end{aligned}$$

» Rayons des cercles figuratifs des régimes au départ et à l'arrivée pour différents couples des tensions au départ et à l'arrivée :

$$R(U_0, U_1) = \frac{U_0 U_1}{\sqrt{b^2 + b'^2}},$$

$$R(225, 220) = \frac{225 \cdot 220}{0,159} = 311\,300 \text{ kVA.}$$

$$R(220, 220) = \frac{220 \cdot 220}{0,159} = 304\,200 \text{ kVA.}$$

$$\text{Pertes minima } \frac{R H^2 U_1^2}{12} = \frac{36,7}{12} 1,144^2 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 = 194 \text{ kw.}$$

» Puissance réactive à l'arrivée correspondante :

$$\frac{1}{2} H U_1^2 = \frac{1}{2} 1,144 \cdot 220^2 = 27\,660 \text{ kVA.}$$

» Calcul des rayons r des cercles d'égales pertes :

$$b d + b' d' = R \left[1 - \frac{XH}{3} + \frac{(R^2 + 2X^2)H^2}{30} \right]$$

$$= 36,72 [1 - 0,061 - 0,002] = 34,56.$$

Pertes, en kilowatts.	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
Pertes minima	194	194	194	194	194	194
différence $\frac{r^2 (b d + b' d')}{U_1^2}$	806	1 806	2 806	3 806	4 806	5 806
r, en kilovolts-ampères	33 600	50 250	62 700	73 000	82 000	90 100

Pertes, en kilowatts.	7 000	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000
Pertes minima	194	194	194	194	194	194
différence $\frac{r^2 (b d + b' d')}{U_1^2}$	6 806	7 806	8 806	9 806	10 806	11 806
r, en kilovolts-ampères	97 600	104 600	111 000	117 100	123 000	128 600

NOTE SUR LES SYSTÈMES DE TRANSMISSION QUART D'ONDE, DEMI-ONDE
ET A IMPÉDANCE CONSTANTE

» Nous nous sommes abstenus dans ce qui précède d'envisager aucune ligne de longueur supérieure à 400 km.

» Ce n'est pas que la méthode générale que nous avons exposée ne s'applique également bien à des distances supérieures et même théoriquement indéfinies, grâce à l'extrême rapidité de convergence des séries utilisées, qui sont l'expression fidèle des fonctions hyperboliques représentant la solution complète ; ce n'est pas non plus qu'il y ait aucune limite d'ordre technique aux distances de transmission, même aux fréquences usuelles de 50 ou 60 p.s, de sorte que le recours aux fréquences réduites 25 ou 15 p.s, si fâcheux à d'autres égards, n'offrirait en somme, contrairement à une opinion heureusement moins répandue, aucun avantage réel. Mais si longue que doive être la ligne de transmission, il nous paraît définitivement acquis aujourd'hui qu'on ne sera en aucun cas amené à la réaliser en une seule ligne homogène n'ayant de liaison avec des usines ou sous-stations qu'à ses deux extrémités.

» En faisant même abstraction des difficultés et inconvénients d'un fonctionnement des usines génératrices à intensité constante, le système de transmission quart d'onde présente, comme le système demi-onde, le défaut fondamental d'être lié, pour une fréquence donnée, à une distance de transmission déterminée, 1 500 km pour le quart d'onde, 3 000 km pour la demi-onde à 50 p.s, et

de ne pas se prêter à une distribution en cours de route. Il ne saurait être question, en effet, de modifier les constantes naturelles des lignes, pour obtenir une vitesse de propagation autre que celle que commande la nature physique du milieu ambiant, ou du moins cette modification ne peut-elle être réalisée pratiquement que d'une manière discontinue, sous forme d'inductances

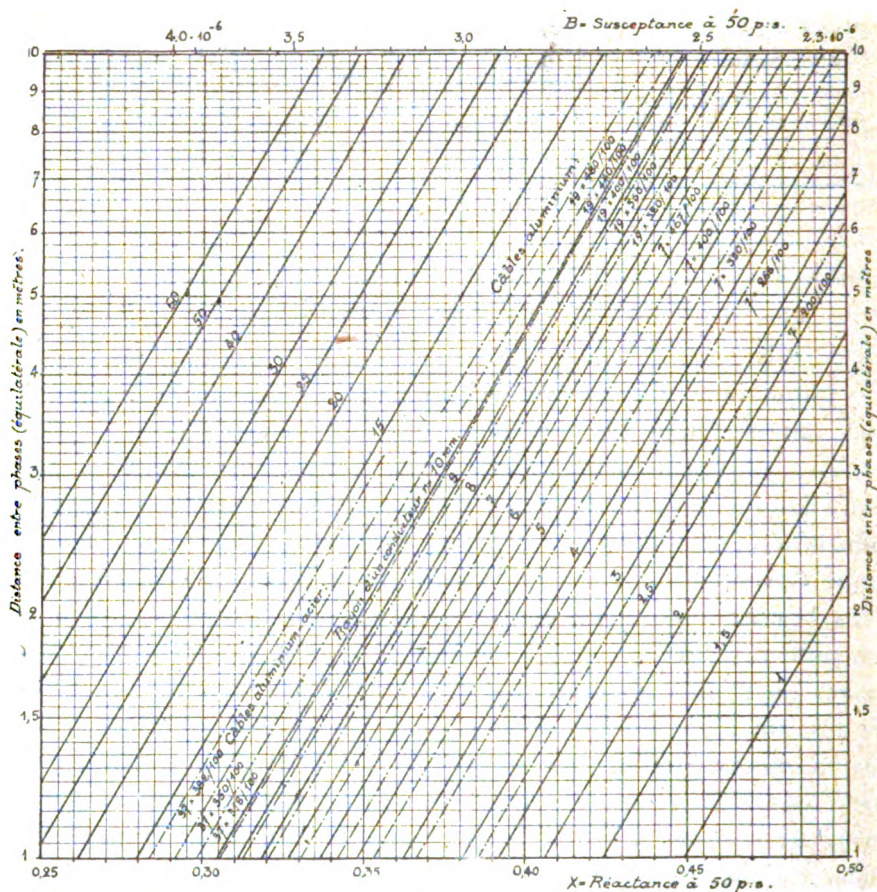


Fig. 7. — Abaque pour le calcul de la réactance et de la susceptance à 50 p.s. des lignes triphasées. Pour les câbles, il a été tenu compte, suivant le nombre de brins 7,37... etc., de ce que le rayon équivalent d'une section circulaire ayant même rayon moyen géométrique, est légèrement inférieur au diamètre extérieur du câble (voir le renvoi de la feuille de calculs).

ou de capacités concentrées, et à intervalles nécessairement espacés, si l'on a égard au prix et à la nature complexe de l'appareillage à très haute tension.

» Au surplus, l'exemple des lignes pupinisées en téléphonie à grande distance, montre qu'il suffit que la plus courte des lon-

guez d'onde des courants à transmettre comprennent encore au moins douze intervalles de bobines de self-induction, distribuées uniformément le long de la ligne, pour que celle-ci devienne pratiquement équivalente à une ligne homogène, c'est-à-dire chargée uniformément.

» Comme la longueur d'onde correspondant à la fréquence de 50 p.s est de 6 000 km, il suffira donc de diviser la ligne en sections homogènes de $\frac{6\,000}{12} = 500$ km au plus, pour être à même, en insérant aux points de jonction des appareils convenables, de communiquer à une ligne industrielle de longueur quelconque telles constantes globales que l'on voudra, et cela sans modification de ses constantes naturelles élémentaires.

» Il serait possible ainsi d'adapter à une distance de transmission quelconque le fonctionnement en quart d'onde, demi-onde, etc., si ces systèmes ne présentaient, outre les inconvénients cités plus haut, celui de donner lieu à toutes charges à des pertes très élevées tenant à la relation :

$$U = I \sqrt{\frac{L}{C}},$$

entre le courant I en tout point, et la tension U , un quart d'onde plus loin, de sorte que le rendement ne saurait être que très mauvais pour une telle ligne de grande longueur.

» Le fonctionnement à tension maintenue constante dans le temps et dans l'espace, qui est l'aboutissement logique de l'évolution moderne des grands réseaux, et sur les propriétés remarquables duquel nous avons rappelé l'attention à diverses reprises, notamment dans notre communication de décembre 1920 à la Société française des Electriciens, ne présente aucun de ces inconvénients : non seulement il s'accommode de la distribution de puissances de grandeur et de signe quelconque, à des intervalles quelconques le long de la ligne, mais les compensateurs synchrones qui, placés à la jonction des différents tronçons, aux centres de distribution ou à des intervalles d'au plus 400 ou 500 km, ont pour mission de régler automatiquement la tension à une valeur constante, assurent par surcroît la distribution à peu près la plus favorable du courant de capacité, et la réduction au minimum des pertes qu'il occasionne.

(¹) Voir encore : Rapport sur la production et la répartition de la puissance réactive : *Conférence internationale des grands Réseaux à très haute Tension*, Paris 1921.

» L'exemple ci-joint d'une transmission de 1 200 km en trois tronçons de 400 km montre que les pertes, au voisinage de $\cos \varphi = 1$, ne surpassent, par tronçon, pour une puissance transmise de 50 000 kilowatts, que de 194 kilowatts seulement, valeur des pertes minima dues au courant à vide, les pertes correspondant à une transmission à courant continu sous la même tension efficace.

» Avec ce dernier mode de transmission, une chute de tension correspondant à la perte d'énergie est d'ailleurs inéluctable, tandis que le réglage de la phase, dans le cas de la transmission à courant alternatif permet d'y disposer de la tension en tout point, indépendamment de la puissance transmise.

» Le facteur de puissance, loin d'être envisagé sous l'aspect fâcheux de cette plaie qu'une insouciance trop prolongée a laissé se développer dans les réseaux de distribution, doit donc être, au contraire, considéré comme un précieux apanage du courant alternatif, en tant que variable et ressource propre supplémentaire de ce mode de transmission.

» Un autre aspect du fonctionnement à tension sensiblement constante dans l'espace et dans le temps, qui tend à expliquer son rendement optimum, est celui qui le représente, suivant le point de vue que M. Boucherot a développé dans des travaux récents, comme réalisant à toute charge un régime à impédance variable, sans onde de retour, ou sans déphasage (Blondel).

» Le rôle des compensateurs synchrones connectés à la ligne aux points de jonction des divers tronçons de self-inductance L , est en effet d'ajouter à leur capacité électrostatique propre C une capacité C' dérivée, variable en grandeur et en signe, de sorte que l'impédance caractéristique

$$\sqrt{\frac{L}{C + C'}}$$

de la ligne complète, s'adapte à toute valeur de la charge pour supprimer sensiblement l'onde de retour, c'est-à-dire maintenir entre le courant I , à peu près en phase avec la tension U , et cette dernière, la relation

$$U = \sqrt{\frac{L}{C + C'}} I.$$

A vide, on doit donc réaliser une impédance infinie, c'est-à-dire :

$$C' = -C,$$

et une vitesse de propagation en régime permanent

$$V = \frac{d}{\sqrt{L(C + C')}}.$$

infinie ⁽¹⁾, d étant la longueur d'un tronçon.

» En résumé, de tous les modes de transmission d'énergie à courant alternatif, le système à tension constante par réglage de la phase en divers points de la ligne (« flat regulation » des Américains ⁽²⁾), est non seulement celui que toutes sortes de nécessités d'ordre pratique (souplesse, adaptation naturelle aux cas les plus variés, rendement élevé, emploi de matériel normal... etc.) ont fait retenir seul pour tous les grands projets actuels, mais encore il nous semble qu'on peut lui trouver une base parfaitement rationnelle et une justification définitive, dans des considérations théoriques de l'ordre le plus général et le plus élevé.

(1) Il n'y a rien, là, de contradictoire avec le principe physique qui assigne à tout signal pour vitesse limite la vitesse de la lumière dans le vide, mais bien plutôt une analogie étroite avec l'analyse de la propagation de la lumière dans les milieux dispersifs, où la mise en vibration forcée des centres électriques que renferment les atomes fait intervenir, par un jeu complexe d'interférences, à côté de la vitesse de propagation fondamentale dans le vide qui sépare les atomes (point de vue microscopique) une vitesse de propagation résultante d'ensemble ou macroscopique, qui peut être, soit plus petite que la précédente (dispersion normale), soit indéfiniment grande (cas de la dispersion anormale ou des bandes d'absorption).

Si la capacité négative C' est constituée par une self-inductance

$$L' = - \frac{1}{\omega_0^2 C'},$$

déterminant avec la capacité C une période propre de résonance du système,

$$\frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{L'C},$$

le rapport de la vitesse de propagation à la vitesse de la lumière prend la forme simple et classique

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}},$$

qui représente en optique l'inverse de l'indice de réfraction.

(2) Voir notamment l'ouvrage récent du principal initiateur de ce mouvement aux Etats-Unis, Frank G. Baum, ingénieur-conseil à San-Francisco; *Atlas of the U. S. A. Electric Power Industry*.

BIBLIOGRAPHIE

- A. BLONDEL ; Calcul des lignes avec self-induction et capacité. *L'Eclairage électrique*, t. XLIX, p. 121 ; *La Lumière électrique*, n° 19, 9 mai 1908, t. II, 2^e série, et 1910, n° 38, 39, 43, 44 et 52.
- A. BLONDEL ; Sur les méthodes modernes de calcul et sur le régime de fonctionnement des lignes de transmission d'énergie à haute tension. *Revue générale de l'Electricité*, n° 5, 6, 7, 8, t. VIII.
- D^r A.-E. KENNELLY ; Les applications élémentaires des fonctions hyperboliques à la science de l'ingénieur électricien ; 1 volume, 1923.
- A. BLONDEL et Ch. LAVANCHY ; Exemples de calcul et de discussion de lignes de transmission à grande distance. Application des abaques hyperboliques universels. *Revue générale de l'Electricité*, 1920, t. VIII, p. 637, 707 et 749.
- PERCY H. THOMAS ; Output and Regulation in long Distance lines; Calculation of the High Tension Line. *Proceeding of the american Institute of electrical Engineers*, et discussion (KENNELLY, KARAPETOFF, STEINMETZ, DALÉMONT), novembre 1909.
- F.-W. PEEK. *General Electric Review*, juin 1913.
- M. LATOUR et C. VIARD ; Calcul pratique des lignes de transmission électriques par les fonctions hyperboliques des variables imaginaires. *Revue générale de l'Electricité*, 1918, t. IV, p. 67. (Description de l'abaque de R.-S. BROWN.)
- L. DRIN ; Etude de la répartition de l'intensité et du potentiel le long d'une ligne de distribution à haute tension. *Revue générale de l'Electricité*, 1919, t. VI, p. 3.
- P. BUNET ; Sur les longues lignes de transmission d'énergie électrique. *Revue générale de l'Electricité*, 1919, t. VI, p. 148.
- A. MCKINSTRY ; Notes on the electrical Calculations of long distance high-voltage transmission lines. *Journal of the Institution of the electrical Engineers*, London, octobre 1920.
- R.-D. EVANS ; Transmission line and transformers. *The electric Journal*, 1921, t. XVIII, p. 356.
- R.-D. EVANS ; Circle Diagrams for Transmission Systems. *The electric Journal*, 1921, t. XVIII, p. 530.
- F.-G. BAUM ; Voltage regulation and insulation for large power long distance, transmission system. *Journal of the american Institute of electrical Engineers*, 1921.
- H.-B. DWIGHT ; Electrical Characteristics of transmission Systems. *Journal of the american Institute of the electrical Engineers*.

INFORMATIONS

ECOLE SUPÉRIEURE D'ELECTRICITÉ

PROMOTION XXIX, 1922-1923. — Examens de sortie. — Le jury d'examens de sortie, présidé par M. J. Rey, président de la Commission administrative et du Conseil de Perfectionnement de l'Ecole supérieure d'Electricité, administrateur-directeur des anciens Etablissements Sautter-Harié et Cie, a accordé dans la séance du 26 juillet 1923, le diplôme d'Ingénieur-Electricien aux Elèves dont les noms suivent :

Officiers délégués par le Ministère de la Guerre : MM. les lieutenants du génie Jouvét, Lachambre, Petit ; MM. les capitaines d'artillerie Bourbon, Gabrié, Gaudibert, Honnorat, Ladroitte.

Officiers et ingénieurs délégués par le Ministère de la Marine : MM. les lieutenants de vaisseau Goudot, Lhoste, Vétillard ; M. le mécanicien principal de 1^{re} classe Martinoli ; M. l'ingénieur de 1^{re} classe du génie maritime Sornein ; MM. les ingénieurs d'artillerie navale Pasquet, Peuch-Lestraëde.

Ingénieurs et élèves ingénieurs adjoints stagiaires du génie rural délégués par le Ministère de l'Agriculture : MM. Arnould, Brunotte, Havy, Lamarre, Talureau, Lourdin, Lucas (Paul), de Stempowski.

Ingénieurs des Ponts et Chaussées délégués par le Ministère des Travaux publics : MM. Bachet, Combet, Varlet, Minot, Rosignol de Fargues.

Elèves ingénieurs délégués par le Ministère des Postes et des Télégraphes : MM. Bélus, Bigorgne, Borel, Champsaur, Garczynski, Giblin, Gosselin, Gravier, Grosmann, Lhermite, Malézieux, Moequard, Montmancix, Ollier, Pocholle, Reyroles, Vandewiele.

Elèves réguliers, 1^{er} à 50^e : MM. Barras, Koën, Maizel, Kaeppe lin, Floner, Maeder, Chaudron, Krach, Ricard, Dumant, Roc, Kartvélichvili, Bronstein, Dehais, Siguier, Galle, Leroy, Lapeyre, Caizergues, Laprêt, Roux, Vital, Rey, Rey du Boissieu, Valentini, Rebois, Crucis, Demory, Fatoux, Wildermuth, Favrey, Fouan, Potier, Martel, Rétif, Pesante, Scloron, Bros, Anjot, Pont, Carette, Delecourt, Jaouen, Dunand, Joly, Lévy, Mongault, Mialane, Capitant, d'Hombres.

51° à 100° : MM. Rudowski, Délye, Durand, Clément, Crépy, Ruhard, Raibaud, Emin, Jouenne, Larue, Castueil, Hygonet, Furtuna, Augier, Beurier, Carré, Lajunias, Denis, Mauger, Debomy, Dubost, Raoult, Foguel, Couvreur, Bories, Cochez, Tellicz, Vignardet, Joux, Rabardeau, Colombant, Pinat, Austry, Macé, Houillon, Terrel, Henry, Batut, Rougeron, Espenel, Marty, Sollier, Bouton, Hochet, Sprecher, Nampon, Gallois, Le Bars, Blondelet, Dauna.

101° à 150° : MM. Forest, Fallet, Decourtive, Courtin, Sperling, Lefebvre, Cohu, Lebouteux, Marois, Rappeneau, Weygand, Deliernas, Tchen, Voisin, Pommery, Cautel, Decaux, Gauvain, Cornu, Gau-Scgonzac, Bézard, Vandenthoren, Bodier, Papin, Boulard, Chaumet, Lély, Palmé, Pierre, Catoni, Dubois (Marcel), Gouriaud, Knocker, De la Belleissue, Desbrière, Desjoyeaux, Lacassagne, Touraton, Andrieu, Liouville, Penet, Charrier, Prud'homme, Lambert, Duverne, de Novion, Dumas, Petresco, Cotterelle, Guérineau.

151° à 167° : MM. Boulanger, Faucillon, Garnier, Roy, Dourgnon, Naoumovitch, Lucas (Robert), Protais, Josse, Bernard, Gélis, Poirette, Popesco, Mandelstam, Hélot, Passaret, Peycru, Tchéou.

Vétérans : MM. Allahverdi, Hadamard.

JAN 28 1924

OME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 29.

NOVEMBRE 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.

Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

Société Anonyme au Capital de 70 Millions de francs

Reg. du Commerce : Seine 70 708.

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au **BOURGET** (Seine), au **HAVRE** et à **LYON**

Agences à **BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES**

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en **France**

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1 200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

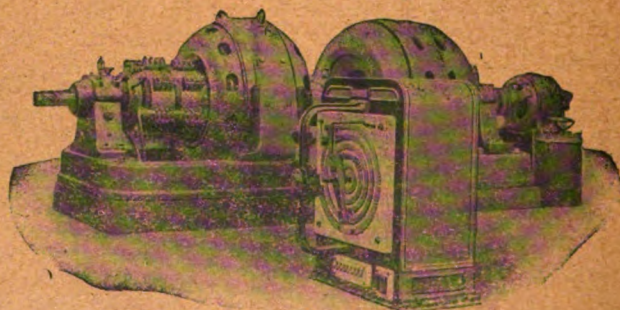
Capital 20 Millions de Francs.

Siège social : **NANCY, Rue Oberlin**

Reg. du Commerce : Nancy 251.

Usines à : **NANCY, PARIS-JAVEL, NANTERRE NANTES**

Bureaux de **PARIS : 26, Rue Lafayette (IX')**



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

NÉCROLOGIE : M. Maurice Leblanc, p. 573.

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du 3 novembre 1923 : Admission de membres titulaires, p. 577. — Membres décédés, p. 579. — Les fours électriques à induction à haute fréquence, (M. RIBAUD), p. 583. — Ondes électromagnétiques de l'ordre du mètre, génération, propagation (MM. MESNY et DAVID), p. 605. — Notes sur les travaux de J. René Benoit en électricité (M. JOUAUST), p. 611.

INFORMATIONS : Prix triennal de la Fondation G. Montefiore, p. 614.

COMPTE RENDU DE L'ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES, p. 615.

BIBLIOGRAPHIE, p. 628.

IL Y A TRENTE ANS, p. 628.

ERRATUM, p. 628.

NÉCROLOGIE

MAURICE LEBLANC

MEMBRE DE L'INSTITUT, ANCIEN PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Notre très regretté président avait défini lui-même en ces termes sa méthode de travail :

« Toutes les fois que j'ai abordé un problème industriel, je l'ai traité comme un problème de physique, sans me préoccuper des solutions existantes et en n'utilisant que des connaissances générales et non des connaissances particulières ; cette méthode m'a souvent conduit à des solutions neuves que les praticiens ont adoptées. »

Il oubliait d'ajouter que, pour assurer à cette méthode toute sa fécondité, il est nécessaire de disposer d'un esprit d'invention et de connaissances théoriques hors de pair.

Réunissant ces conditions à un degré exceptionnel, Maurice

Leblanc a été non seulement un réalisateur dans toute la force du terme, mais aussi un précurseur.

La plupart de ses conceptions, qui paraissaient parfois chimériques lorsqu'il les exposait, ont été, dans la suite, consacrées par la pratique industrielle.



M. MAURICE LEBLANC

La Société française des Electriciens n'a pas oublié les communications faites par lui en des séances qui marquèrent d'importantes étapes dans l'électrotechnique.

Dès 1891, puis en 1898 et 1899, il nous entretenait de l'application des courants alternatifs à la transmission de l'énergie et, en même temps, il faisait breveter successivement : un transformateur

de fréquence et de tension, employé depuis par la Compagnie du Chemin de fer du Nord et par la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité à Paris ; un alternateur compound, les avanceurs de phase, le transformateur rotatif en cascade, les circuits amortisseurs.

En 1899, à une époque où les résultats des surtensions étaient constatés sur un grand nombre de réseaux, sans que leur cause fût bien connue, il s'attacha à leur étude et en fit le sujet d'une conférence à l'Ecole supérieure d'Electricité.

En 1901, il exposait à la Société le programme de l'étude entreprise par son Président, M. Hillairet, sur le mouvement des machines à vapeur et l'accouplement des alternateurs en parallèle.

En 1905, il nous présentait les soupapes à vapeur de mercure, dont il avait deviné la future importance industrielle.

D'autre part, en prenant la présidence de notre Société en 1906, il émettait l'avis qu'après expérience faite, l'avenir de la transmission électrique paraissait être dans l'emploi des courants continus.

Et effectivement, en janvier dernier, en nous indiquant les réalisations atteintes dans la construction industrielle des soupapes à mercure, il nous montrait que leur emploi, combiné avec celui d'un robinet électrique à grille, permettait de passer à volonté du courant continu au courant alternatif de toute fréquence, et inversement. Il nous en signalait les applications immédiates dans la traction (tramways, locomotives électriques et même automobiles sur route), par l'emploi du courant continu transformé en courant à haute fréquence actionnant des moteurs sans contact direct.

Dans sa même allocution présidentielle, il avait souligné l'intérêt que présenterait l'utilisation de l'électricité provenant des Alpes ou des Pyrénées pour l'assèchement des lagunes disséminées sur le littoral méditerranéen; or, voici que nos amis italiens appliquent cette méthode en grand dans la lutte contre la malaria et pour l'amélioration de leurs cultures.

Ayant, à la suite de ses travaux, pris des engagements comme ingénieur conseil envers diverses sociétés étrangères, il constata que l'application de ses procédés était systématiquement étouffée. Choqué dans son extrême loyauté, il se détourna momentanément de l'électricité, et cette période fut consacrée par lui à

la recherche d'une machine frigorifique qui le conduisit à l'invention de son célèbre condenseur et à l'étude des machines rotatives à très grande vitesse.

Sa renommée, véritablement mondiale, lui avait valu, en 1913, l'honneur d'être élu président de la Commission électrotechnique internationale.

Il est parti, en pleine vigueur intellectuelle, laissant inachevée la tâche énorme qu'il avait entreprise et dont les résultats furent si féconds pour l'industrie électrique.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du samedi 3 novembre 1923 ⁽¹⁾

Présidence de M. P. ESCHWÈGE

La séance est ouverte à 17 heures.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

M. LE PRÉSIDENT. — Je souhaite la bienvenue en votre nom à M. Semenza, Président de l'Associazione Elettrotecnica, présent au Bureau, qui est un des plus fidèles amis de la Société française des Electriciens, et dont la Société aura le plaisir d'entendre une conférence le 1^{er} décembre prochain.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Arbelt (Pierre), ingénieur des Arts et Manufactures et E. S. E., ingénieur à la Compagnie de Saint-Gobain, 71, rue du Cardinal-Lemoine, à Paris (5^e). — Présenté par MM. J. Grosselin et George.

Bellon (Jean-Joseph-Marie), directeur des Usines Gaz et Electricité de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, Cahors (Lot). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Berg (René), sous-lieutenant de réserve, 9^e Génie, sous-chef du Service électrique de l'A. F. R., S. P. 77, 71, rue de Provence, à Paris (9^e). — Présenté par MM. P. Janet et G.-F. Guébert.

Bonnin (Jean-Charles), ingénieur à la Société anonyme des Ateliers J. Carpentier, 9 bis, rue Alexandre-Guilmaut, à Meudon (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. G. Carpentier et J. Vassilière.

Bourgoin (Louis-Jean-Jules), ingénieur des Services électriques de Nevers de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, 7, rue du Moulin-de-l'Ecorce, à Nevers (Nièvre). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Cady (Francis-E.), directeur du Service des Recherches, National Lamp Works of general Electric Co., à Nela Park (Cleveland). — Présenté par MM. A. Blondel et Hyde.

Chauveau (Louis-Lucien-Eugène), ingénieur à la Société française radiotélégraphique, 1, rue Mizon, à Paris (15^e). — Présenté par MM. Broca et J. Grosselin.

Chemin (Jean-Emile), agent technique, attaché au Service électrique de la Compagnie du Bourbonnais, 1, quai de la Pêcherie, à Lyon; 30, route de Strasbourg, à Lyon Saint-Claire (Rhône). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Du Crest (Michel-Bernard-Auguste), ingénieur des Services électriques dans Abbeville de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie;

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, et des conclusions des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

118, rue Saint-Gilles, à Abbeville (Somme). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Croizat (Alphonse-Marie-Joseph), ingénieur électricien du Service Gaz, à Rennes, de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie; Usine à gaz, boulevard Voltaire, à Rennes (Ille-et-Vilaine). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Demarcq (Menotti-Alexandre-Emile), administrateur-délégué de la Société de Force et Lumière électriques du Nord, 67, rue de Dunkerque, à Paris (9°). — Présenté par MM. P. Eschwège et Polack.

Dessirier (Jean-Louis-Adrien), directeur des Services Gaz et Electricité dans Aurillac, de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, Aurillac (Cantal). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

de Dianous de la Perrotine (Robert-Joseph-Prosper-Marie), ingénieur à l'Electricité de Strasbourg, 16, rue Sleidan, à Strasbourg (Bas-Rhin). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Echinard (Louis-Irénée), directeur des Usines Gaz et Electricité de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, à Bayonne, allées Maritimes, à Bayonne (Basses-Pyrénées). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Flix (René), directeur de l'Agence de Paris des Sociétés « Le Fil Dynamo » et « Fibre et Mica » de Lyon, à Paris, 52, rue d'Angoulême, 63, boulevard Malesherbes, à Paris (8°). — Présenté par MM. Leblanc et Bossu.

Galle (Jean-Baptiste-Paul-Henri), ingénieur E. S. E., élève à la Section de Radiotélégraphie, 38, rue Gay-Lussac, à Paris (5°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Gerbert (Henry-Charles), sous-directeur de l'Electricité de Strasbourg, 1, rue du 22-Novembre, à Strasbourg (Rhin). — Présenté par MM. P. Eschwège et E. Brylinski.

Gouverneur (Germain), administrateur directeur de la Société Force et Lumière électriques du Nord, 67, rue de Dunkerque, à Paris (9°). — Présenté par MM. Eschwège et Polack.

III (Pierre-Carlos), ingénieur-directeur de la Société d'Electricité de Turekheim, Turekheim (Haut-Rhin). — Présenté par MM. P. Eschwège et J. Grosse-lin.

Kuentz (Marie-Joseph-Louis), directeur des Services Gaz et Electricité, à Rennes, de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, 8, boulevard de La Tour-d'Auvergne, à Rennes (Ille-et-Vilaine). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Largeron (Anthelme-François-Joseph), directeur des Services Gaz et Electricité dans Nevers, de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, Usine à gaz, à Nevers (Nièvre). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Legrand (Joseph-Louis), directeur des Services Gaz et Electricité dans Abbeville, de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, à Abbeville (Somme). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Leibovici (Willy-Guillaume), ingénieur E. S. E., directeur de la Société « Lampyre » (lamps électriques), 21-23, rue Albouy, à Paris (10°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Main et C^o, représentés par M. le Dr Proust, 91, avenue de Clichy, à Paris (17°). — Présentés par MM. Bossu et Leblanc.

Mallet (Marcel-Alexandre-Marie), ingénieur des Services électriques dans Aurillac de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, Aurillac (Cantal). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Meyer (Emile-Otto), directeur de l'Electricité de Strasbourg, 29, rue Gœthe, à Strasbourg (Bas-Rhin). — Présenté par MM. P. Eschwège et Brylinski.

- Pechard** (Jules-Joseph), directeur des Usines Gaz et Electricité de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, à Vichy, Vichy (Allier). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.
- Pottevin** (Florian), ingénieur à la Maison Bréguet, 12, rue du Loing, à Paris (14°). — Présenté par MM. de Pistoye et J. Grosselin.
- Pare** (Marcel), ingénieur en chef de la Société saint-quentinoise d'Eclairage, de Chauffage et de Force motrice, 43, rue de Boulainvilliers, à Paris (16°). — Présenté par MM. E. Brylinski et P. Eschwège.
- de Puineuf** (Amédée-Alain-Marie), Ingénieur des Services électriques à Rennes de la Compagnie du Bourbonnais, P. de Lachomette, Villiers et Cie, 12, boulevard de la Tour-d'Auvergne, à Rennes (Ille-et-Vilaine). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.
- Rostand** (Raymond-Marie), actuellement sous-lieutenant observateur au 37° régiment d'aviation, 4° escadrille à Beni-Maleck, près Ouezzan (Maroc). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Roux** (Pierre), ingénieur stagiaire aux Etablissements Schneider, à Champagne-sur-Seine, 20, rue des Plantes, à Paris (14°). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Schwander** (Pierre-René), administrateur délégué de la Société électrique de Belchamp, à Montbéliard (Doubs). — Présenté par MM. P. Eschwège et J. Grosselin.
- Semenza** (Guido), ingénieur-conseil, 39, Monte Napoleone, à Milan (3) (Italie). — Présenté par MM. P. Janet et J. Grosselin.
- Thurwanger** (Jean-Jacques-Louis), Sous-lieutenant de réserve au 32° régiment d'aviation, 57, quai des Grands-Augustins, à Paris (6°). — Présenté par M. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Toulon** (Pierre-Marie-Gabriel), ingénieur-conseil, ingénieur à la Société de Recherches et Perfectionnements industriels, 106 bis, rue de Rennes, à Paris (6°). — Présenté par MM. Péridier et J. Grosselin.
- Trollet** (Emmanuel), ingénieur électricien de la Société des Mines d'Andernay-Chevillon, à Tucquegnieux (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. P. Eschwège et Bitouzet.
- Trolley de Prevaux** (Pierre-Marie-Martin), secrétaire général de l'Electricité de Strasbourg, 20, rue Erckmann-Chatrion, à Strasbourg (Bas-Rhin). — Présenté par MM. Eschwège et J. Grosselin.
- Ungerer** (Jean-Ernest), sous-directeur de l'Electricité de Strasbourg, 5, rue Obwacht, à Strasbourg (Bas-Rhin). — Présenté par MM. Eschwège et J. Grosselin.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. LE PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Dominé, de Gramont, Maurice Leblanc et Violle*.

Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société et rappelle comme suit la carrière de MM. Violle et Maurice Leblanc.

« Notre Société a été, depuis notre dernière séance, douloureusement frappée par la mort de deux de ses anciens Présidents : M. Violle et M. Maurice Leblanc.

» M. Violle fut l'un des plus distingués physiciens de ces cinquante dernières années. Il s'attacha successivement à des recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur, sur les hautes températures de fusion, sur les phénomènes accompagnant la grêle et les geysers.

» C'est au cours de ses expériences sur la fusion qu'il inventa l'étalon de lumière universellement connu, qui porte son nom et d'où le Congrès international des Electriciens de 1889 tira la définition de la bougie décimale.

» De ses travaux avec Moissan sortirent quelques-uns des perfectionnements qui ont fait entrer le four électrique dans la pratique industrielle; c'est, d'autre part, pour constituer un calorimètre qu'il fut conduit à réaliser le flacon de verre mince à double enveloppe qui a reçu, depuis, tant d'applications.

» Elève à l'Ecole normale supérieure, puis préparateur à cette Ecole, professeur aux Facultés des sciences de Grenoble et de Lyon, au Conservatoire national des Arts et Métiers, M. Violle fut, en 1897, appelé à remplacer, à l'Académie des Sciences, le grand physicien Fizeau. Il présida de nombreuses Sociétés savantes; notre Société eut l'honneur de l'avoir pour président en 1899.

» M. Violle laissera chez les nombreux élèves qu'il a formés, chez tous ceux d'entre nous qui l'ont connu, le souvenir d'un physicien de haute valeur en même temps que du plus désintéressé et du plus affable des savants. »

» La mort de Maurice Leblanc met en deuil tous les électriciens, mais elle sera particulièrement ressentie à la Société française des Electriciens, dont il fut, pendant plus de trente ans, le fidèle ami.

» Depuis l'année 1891, où il nous rendit compte de ses recherches sur l'application des courants alternatifs à la transmission de l'énergie, jusqu'à cette séance de janvier 1923 où il nous exposa ses vues -- peut-être prophétiques -- sur l'emploi combiné du courant continu pour la transmission de l'énergie et des courants alternatifs à haute fréquence pour l'alimentation sans contact direct des moteurs de traction, nous avons pu suivre la constante évolution de cet étonnant cerveau qui eut tant d'influence sur le

développement de l'électricité industrielle depuis un quart de siècle.

» La technique des courants alternatifs était encore très obscure, il y a trente ans, lorsque ces précurseurs qui s'appelaient Leblanc, Dobrowolski, Ferraris, Tesla, commencèrent à y projeter les premières lueurs. Leblanc fut le plus tenace et, pendant des années, il ne cessa d'appliquer les ressources d'un ingéniosité sans pareille à résoudre les problèmes de la production, de la distribution, de l'emploi de l'énergie électrique.

» Le transformateur de fréquence et de tension — plus connu sous l'appellation de panchahuteur que lui avait donnée l'esprit parfois gavroche de Leblanc — les procédés de démarrage des moteurs asynchrones, les circuits amortisseurs, les avanceurs de phases, les alternateurs asynchrones ont marqué d'importants progrès dans la construction électrique.

» Revenant à la mécanique qui avait occupé les débuts de sa carrière. Leblanc inventa, au cours de ces dernières vingt années les machines frigorifiques, les machines rotatives à grande vitesse, le condenseur, qui ont popularisé son nom chez les mécaniciens.

» Mais sa conférence de janvier dernier, que je rappelais tout à l'heure, montre combien il était néanmoins resté fidèle à l'étude des problèmes électriques

» C'est un grand électricien qui disparaît, en pleine vigueur intellectuelle; ce qu'a produit dans le domaine de l'électricité sa féconde activité nous laisse entrevoir ce que nous pouvions encore attendre de lui, ce que nous perdons en le perdant.

» Président de la Société française des Electriciens en 1904, de la Commission électrotechnique internationale en 1913, premier élu de la Section des Applications industrielles de l'Académie des Sciences, Maurice Leblanc était aussi apprécié à l'étranger qu'en France et nombreuses sont les sociétés industrielles qui, en Amérique, en Angleterre, en France, faisaient appel à ses conseils et utilisaient ses brevets.

» Mais ce n'est pas seulement un éminent collègue que nous voyons si prématurément disparaître, c'est un véritable ami qui, par sa bonté, sa simplicité, la droiture de son caractère, s'était fait une place à part dans nos cœurs.

» Son souvenir y restera gravé comme celui d'un des hommes qui ont le plus grandement honoré la science et l'industrie électrique françaises. »

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

FOURS ÉLECTRIQUES A INDUCTION A HAUTE FRÉQUENCE

Exposé des divers résultats obtenus dans l'étude et la réalisation des fours électriques à induction à haute fréquence : historique, différents procédés d'alimentation de ces fours, rendements, avantages et résultats obtenus dès maintenant dans le domaine industriel.

M. RIBAUD. — « Avant d'aborder la question du four électrique à induction à haute fréquence, je voudrais rappeler d'un mot les avantages et les inconvénients des divers systèmes de chauffage électrique dont disposent actuellement l'industrie et les laboratoires. Pour qu'un procédé de chauffage soit économique, il semble indispensable de créer directement la chaleur au sein de la substance à chauffer; les procédés dans lesquels on amène la chaleur de l'extérieur, à travers un creuset réfractaire toujours mauvais conducteur de la chaleur, ont nécessairement un mauvais rendement calorifique. Les divers systèmes de chauffage direct, actuellement en usage, ont leurs inconvénients. Le four à arc dans lequel le courant est amené à la substance par des électrodes en graphite est peu maniable, la température est extrêmement variable d'un point à l'autre de la masse; enfin et surtout, dans beaucoup de cas, le carbone constitue une impureté très gênante. Le four à résistance dans lequel la substance à chauffer joue le rôle de résistance, manque beaucoup de souplesse; il ne convient pas pour des masses de matière faites de morceaux discontinus; dans le cas des métaux ou alliages dont la conductibilité électrique est grande, il nécessite, pour les grandes masses de matière, des intensités extrêmement élevées; de très grandes difficultés se présentent d'ailleurs lorsque l'on veut amener d'aussi forts courants dans la substance sans la souiller (difficulté de réalisation des contacts électriques, nécessité de refroidir les électrodes d'amenée du courant). On a tourné élégamment la plupart des difficultés précédentes en disposant la substance à chauffer sous forme d'un anneau continu qui constitue le secondaire d'un véritable transformateur industriel, réalisant ainsi le four à induction à basse fréquence. Dans ce four, les électrodes sont complètement supprimées, la substance à chauffer peut être entourée d'un isolant calorifique approprié n'apportant pas d'impuretés; toutefois l'on se trouve dans la nécessité de maintenir à basse température l'enroulement et le circuit magnétique du four; d'autre part, si le rendement électrique du four est très bon, il n'en est pas de même du rendement calorifique, surtout aux

hautes températures, la forme que l'on est amené à donner au four (canal de grande longueur et de faible section) étant incompatible avec un bon isolement calorifique. On est amené, en outre, à donner au four des dimensions hors de proportion avec le volume du métal à traiter; enfin, le four ne fonctionne qu'à la condition d'introduire dans le canal de chauffe une masse continue de métal; on y arrive, on le sait, soit en introduisant dans le four le métal à l'état de fusion, soit en laissant dans le four un peu du métal à la fin de chaque coulée, de façon à constituer un anneau continu qui amorcera la fusion du reste de la masse.

» Dans le four à induction à haute fréquence que nous allons étudier, l'utilisation de courants de haute fréquence permet une très grande simplification de construction, en particulier la suppression du circuit magnétique. Un tel four est un transformateur sans fer constitué par un solénoïde de forme cylindrique ou tronconique à l'intérieur duquel on placera la substance conductrice à chauffer; si l'on envoie dans l'enroulement des courants alternatifs de fréquence convenable (20 000 périodes par seconde ou plus) la substance conductrice devient le siège de courants induits (courants de Foucault) qui l'échauffent.

HISTORIQUE

» La première tentative d'utilisation de ce principe de chauffage est contenue dans un brevet pris, en 1905, par la Société Schneider et Cie du Creusot (¹), sous le titre : « Four électrique à induction par courants de haute fréquence ». On y trouve la description complète d'un modèle de four (fig. 1) dans lequel le solénoïde inducteur à haute fréquence est constitué par une série d'anneaux de cuivre rouge 1, servant en même temps de frettage pour maintenir la matière réfractaire 2, qui forme le creuset. Chacun de ces anneaux a ses extrémités serrées par un joint isolant 3, et reliées électriquement aux anneaux voisins par une connexion conductrice. Le brevet précise d'ailleurs « qu'au lieu d'anneaux séparés superposés, le frettage peut être constitué par une hélice continue, dont les deux extrémités seraient assujetties à des points fixes et reliées aux pôles de la source de courant. » « Le four est complété par un trou de coulée 4, un trou de char-

(¹) Brevet français N° 561 627, 13 juillet 1905.

gement 5, et un couvercle 6. Le four étant ainsi constitué, on alimente le solénoïde par du courant alternatif de tension et de fréquence convenables (100 000 alternances par seconde, par exemple) produit par un générateur de courant de système connu, et l'on y fait les opérations métallurgiques courantes... ». Le brevet ne dit rien de la nature du générateur à haute fréquence utilisé; rien n'a d'ailleurs été publié sur les résultats obtenus dans le four.

» Le Dr E.-F. Northrup, qui ne semble pas avoir eu connaissance du brevet Schneider, commença, en 1916, au laboratoire de l'Université de Princeton, puis au laboratoire de la « Pyroelectric-Instrument Company », de Trenton, une série d'expériences destinées à mettre au point l'appareil producteur de courants de

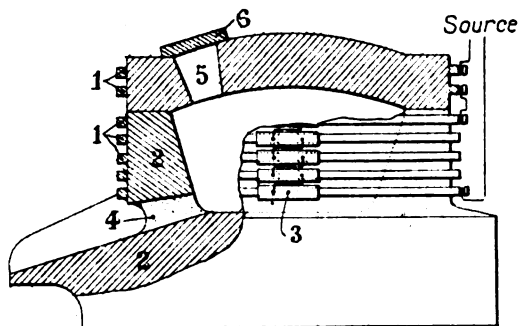


Fig. 1. — Schéma du four à induction à haute fréquence système Schneider.

haute fréquence et les fours utilisant ces courants. Le travail était subventionné par « The Ajax Metal Company », et les parties mécaniques étaient construites par la Pyroelectric Company. Enfin, en 1920, la « Ajax Electrothermic Corporation » fut organisée pour la construction et la vente des convertisseurs haute fréquence et des fours. Nous donnerons plus loin la description de ces appareils.

» Sans rien connaître des recherches précédentes, nous avons entrepris nous-même, dès janvier 1920, une étude systématique de la question. Les premiers essais, commencés à l'Institut de Physique de Strasbourg sur les conseils de M. P. Weiss, n'ont porté que sur une installation de puissance réduite (2 kilowatts), réalisée avec les seules ressources du laboratoire; une subvention de la Direction de l'Office national des Recherches scienti-

fiques et industrielles et des Inventions nous a permis de porter, en 1921, la puissance de notre installation jusqu'à 8 kilowatts. Le Comité directeur de la fondation Edmond de Rothschild, que je suis heureux de remercier ici, a bien voulu, dans la suite, subventionner ces travaux qui sont, pour l'instant, orientés vers les recherches aux très hautes températures. La puissance disponible dans notre installation est actuellement de 25 kilowatts.

» La Direction de l'Office national des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions, mise au courant en 1920 des expériences faites à Strasbourg, a entrepris en 1921 des essais qui l'ont amenée à la mise au point d'une installation modèle de 2 kilowatts pour laboratoires.

APPAREILS PRODUCTEURS DE COURANTS A HAUTE FRÉQUENCE

» Avant d'entrer dans le détail des installations à haute fréquence, nous pensons bon d'entreprendre une étude critique rapide des diverses méthodes susceptibles de fournir les courants à haute fréquence nécessaires pour alimenter les fours.

» L'industrie réalise actuellement, pour les besoins de la télégraphie sans fil, des alternateurs à haute fréquence analogues aux alternateurs industriels, mais tournant à de plus grandes vitesses et fournissant des fréquences voisines de 30 000 p/s; ces alternateurs, dont la puissance individuelle dépasse dès maintenant 500 kilowatts, conviendraient dans beaucoup de cas, mais leur prix extrêmement élevé en interdit l'emploi.

» L'arc chantant fournit également des courants de haute fréquence avec des puissances susceptibles d'atteindre plusieurs centaines de kilowatts. Son fonctionnement exige malheureusement une installation assez compliquée comportant un dispositif pour produire la rotation et le refroidissement des électrodes, ainsi qu'un électroaimant supplémentaire destiné au soufflage magnétique de l'arc. L'alimentation de l'arc doit, en outre, se faire au moyen d'une source à courant continu de haute tension, ce qui complique encore l'installation et en accroît notablement le prix.

» Les lampes génératrices à trois électrodes permettent, on le sait, d'atteindre dès maintenant 8 kilowatts par unité (lampe Holweek, en service à la Tour Eiffel); malheureusement, ces lampes sont encore fragiles et d'un maniment délicat; comme l'arc chantant, elles ont, en outre, l'inconvénient de nécessiter une source continue à tension très élevée. Bien que le problème soit assez

analogue à celui qui se pose en télégraphie sans fil, on est amené, on le voit, à rejeter pour l'instant les installations à ondes entretenues et à adopter les installations à étincelles que la télégraphie abandonne de plus en plus.

» SYSTÈMES GÉNÉRATEURS A HAUTE FRÉQUENCE A ÉTINCELLES. — Supposons que l'on relie une capacité à une source continue à haut potentiel, capable de la charger progressivement; supposons, en outre, que cette capacité de valeur C puisse se décharger à travers un éclateur et un solénoïde de self-inductance L . Dès que la différence de potentiel entre les deux armatures de la capacité aura atteint une valeur suffisante pour que jaillisse une étincelle entre les deux pôles de l'éclateur, la capacité se décharge brusquement à travers l'étincelle en fournissant dans tout le circuit un courant alternatif amorti (décharge oscillante) dont la période T , très faible, est fournie par la relation $T = 2\pi\sqrt{CL}$. La capacité est rechargée ensuite lentement par la source à haut potentiel jusqu'à ce qu'il éclate une nouvelle étincelle. On obtient, en définitive, avec une telle installation, toute une série d'étincelles oscillantes, de très courte durée, séparées par des intervalles de temps beaucoup plus longs que la durée d'une étincelle.

» Au lieu d'utiliser une source de courant continu pour charger la capacité, il est beaucoup plus commode et plus économique d'utiliser une source de courant alternatif (transformateur survolteur). Deux cas sont d'ailleurs à considérer : si le transformateur utilisé a une faible puissance ou si l'on règle la distance des pôles de l'éclateur, de façon que le potentiel explosif soit sensiblement égal à la tension maximum fournie par le transformateur, il éclatera une seule étincelle par alternance; si le transformateur utilisé a une puissance suffisante, si sa self-inductance équivalente n'est pas trop élevée et si la distance des pôles de l'éclateur est suffisamment faible, il pourra éclater plusieurs étincelles pendant une alternance du secteur, comme le montre la figure 2. La courbe en pointillé indique les valeurs de la différence de potentiel que le transformateur établirait aux bornes de la capacité si aucune étincelle ne se produisait. Si le potentiel explosif correspondant à la distance des pôles de l'éclateur a pour valeur V , une première étincelle se produit en 1 et la capacité se décharge brusquement, puis est rechargée par le transformateur jusqu'à ce qu'une deuxième étincelle éclate en 2. La figure correspond, on le voit au cas

de 3 étincelles par alternance, c'est-à-dire 300 étincelles par seconde dans le cas d'un courant alternatif à 50 périodes par seconde. Sur la figure, on a, à dessein, exagéré la durée de chacune des décharges oscillantes.

» L'énergie mise en jeu dans chaque étincelle a pour valeur $1/2 CV^2$; on pourra, on le voit, modifier la puissance fournie au four en changeant la capacité, en modifiant la tension utile du transformateur, ou le nombre des étincelles par unité de temps. Au lieu d'un éclateur fixe, on peut, bien entendu, utiliser un écla-

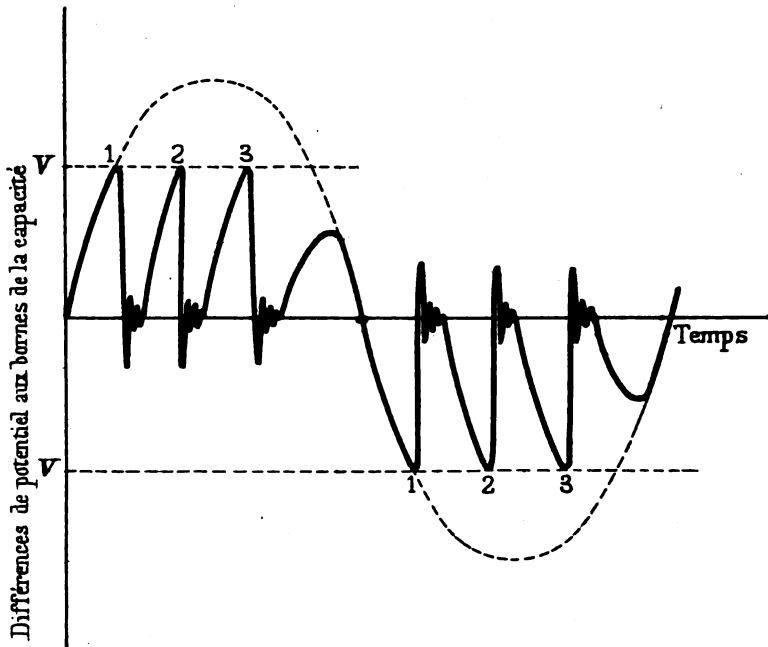


Fig. 2. — Différences de potentiel aux bornes de la capacité d'une installation à haute fréquence à étincelle alimentée en courant alternatif. tourneur dont on réglera convenablement la vitesse de rotation.

» En résumé, une installation à étincelles comportera comme organes essentiels un transformateur survolteur, une capacité et un éclateur. Un dispositif de réglage permettra de faire varier la puissance. Il n'est peut-être pas inutile d'insister également sur la nécessité d'introduire en général une self-induction supplémentaire dans le circuit d'alimentation du transformateur ; on sait, en effet, qu'un éclateur ne fournit une étincelle pure, sans superposition de régime d'arc, que si la self-inductance équivalente L du transformateur et la capacité C réalisent la condition de résonan-

ce : $LC \omega^2 = 1$ (ω étant la pulsation du courant d'alimentation). En pratique, il sera bon de ne pas trop s'écarter de cette condition de résonance, si l'on veut avoir un bon rendement.

» DESCRIPTION DES APPAREILS GÉNÉRATEURS UTILISÉS POUR L'ALIMENTATION DES FOURS. — Ces appareils, analogues à ceux réalisés pour les installations de télégraphie sans fil, ne diffèrent que par des points de détail (choix de l'éclateur, mode de réglage de la puissance).

» On trouvera le détail des appareils Ajax-Northrup dans un

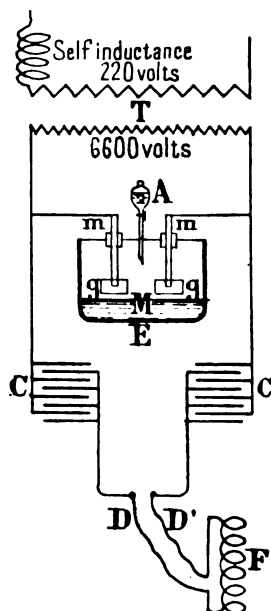


Fig. 3. Schéma de montage du convertisseur Ajax (20 kilowatts).

grand nombre de mémoires dont nous donnons ci-dessous la bibliographie ⁽¹⁾. Les appareils producteurs de courants à haute fréquence fonctionnant sur courant monophasé ont été réalisés à diverses échelles : 2, 15, 20, 25 et 35 kilowatts. Deux types de 60 et 105 kilowatts ont été construits pour fonctionner sur secteur triphasé.

» La figure 3 indique le schéma d'une installation de 20 kilo-

⁽¹⁾ NORTHROP : *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1917, t. XVII, p. 685. — *Transactions of the Faraday Society*, 1917, t. XIII, p. 213. — *Transactions of the american electro-chemical Society*, 1919, t. XXXV, p. 69. — *The Iron Age*, 1919, p. 1 294. — *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1919, t. XXI, p. 258. — *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1921, t. XXXIV, p. 309 et 1 097.

watts. Le transformateur survoiteur, alimenté sous 220 volts, 60 périodes par seconde, fournit au secondaire 6 600 volts ; le secondaire est relié, d'une part, aux deux capacités C, puis aux deux extrémités de l'enroulement F du four par deux câbles D et D'. L'éclateur fixe E est constitué par deux tiges de cuivre M vissées à leurs extrémités dans des blocs de graphite ou de cuivre g placés à faible distance d'un bain de mercure M. Dans cet éclateur, totalement fermé, on maintient une atmosphère réductrice en y faisant couler goutte à goutte de l'alcool par un appareil à robi-

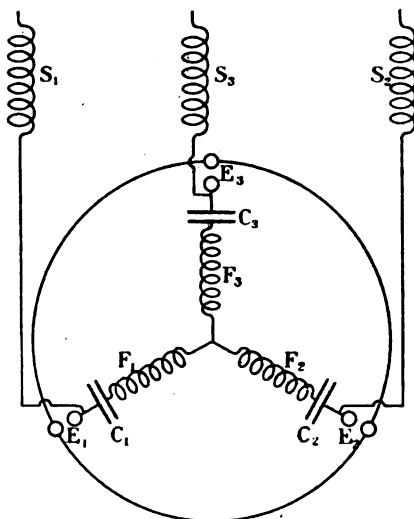


Fig. 4. — Montage schématique de l'installation de 60 kilowatts.

net A ⁽¹⁾. Un volant de réglage permet de faire varier la longueur de la coupure de l'éclateur et, par suite, la puissance de l'installation. L'ensemble des appareils (transformateur, éclateur, condensateur) est disposé à l'intérieur d'une cage métallique reliée à la terre ⁽²⁾.

» Le convertisseur de 60 kilowatts comporte trois circuits de décharge identiques à celui de 20 kilowatts et alimentés par les trois phases d'un transformateur triphasé. La figure 4 donne la disposition schématique des circuits : F₁, F₂, F₃ représentent les trois parties de l'enroulement du four ; C₁, C₂, C₃, les trois capacités et E₁, E₂, E₃, les éclateurs. S₁, S₂, S₃ sont les secondaires du transfor-

⁽¹⁾ Pour les grandes puissances, cet éclateur est refroidi par une circulation d'eau.

⁽²⁾ Le prix de vente actuel d'un tel convertisseur de 20 kw est d'environ 50 000 fr.

mateur survolteur triphasé alimenté par les trois phases du secteur; dans certaines installations, on supprime le transformateur survolteur et on branche directement les trois fils d'entrée sur les lignes d'un secteur triphasé 6 600 volts; S_1 , S_2 , S_3 représentent alors les self-inductances disposées sur les trois circuits d'alimentation des capacités.

» Pour alimenter les fours qui ont servi dans nos expériences, nous avons adopté une installation à éclateur tournant. L'installation initiale, prévue pour des mesures systématiques, avait été compliquée à dessein pour la rendre plus souple (fig. 5). Le montage comporte un transformateur réducteur T_1 ⁽¹⁾ alimenté par le courant du secteur (120 v, 50 p:s) et fournissant, à la sortie, des tensions variables entre 0 et 120 v. Le courant, à la sortie de T_1 , alimente un transformateur T_2 (120/12 000 v). Une self-induc-

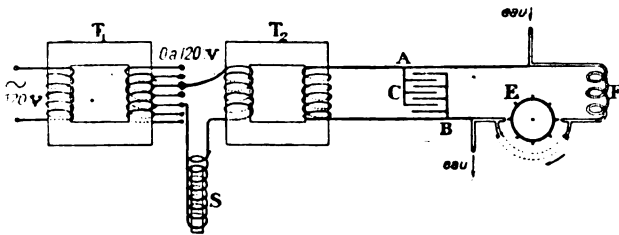


Fig. 5. — Schéma de montage de l'appareil utilisé par l'auteur pour la production de courants de haute fréquence.

tance variable S , placée sur le circuit d'alimentation de T_2 , permet de réaliser, dans chaque cas, la condition de résonance. Le reste du montage est visible sur la figure. L'éclateur utilisé est un éclateur tournant avec refroidissement des électrodes fixes par circulation d'eau. Un modèle simple, qui convient pour des puissances de quelques kilowatts, est fait d'un disque métallique muni de pointes tournant entre deux pièces métalliques fixes parcourues par un courant d'eau. Celle-ci circule d'une électrode à l'autre à travers un tube de caoutchouc ; l'expérience montre que, pour des tensions atteignant 12 000 volts, et pour une colonne d'eau de 20 cm de longueur, l'énergie qui passe dans la dérivation ainsi constituée est négligeable. Pour les très grandes puissances, il y a avantage à utiliser un éclateur un peu différent, de façon à mieux répartir l'usure des électrodes fixes. La solu-

⁽¹⁾ Un régulateur d'induction conviendrait très bien, mais son prix est trop élevé.

tion à laquelle nous nous sommes arrêté est la suivante. Un disque muni de tiges conductrices amovibles tourne entre deux disques métalliques fixes, sur lesquels sont vissées des parties métalliques à méplat, en nombre égal au nombre des pointes du disque mobile. Pour éviter que les étincelles se produisent toujours au même endroit des méplats fixes, les tiges sont fixées à des distances variables de l'axe de rotation, de façon à balayer successivement tous les points de chacun des méplats conducteurs. Les disques métalliques sont refroidis par une circulation d'eau. Le réglage de la puissance se fait en agissant sur T_1 ou sur la vitesse de rotation de l'éclateur. On peut, d'ailleurs, sans inconvénient, simplifier l'installation en supprimant le transformateur T_1 et en réglant la puissance soit par modification de la self-induction, soit en changeant la vitesse de rotation de l'éclateur et, par suite, le nombre des étincelles. Le prix de revient d'une telle installation de 20 kilowatts est d'environ 12 000 francs.

» ETUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE DU RENDEMENT DU FOUR A HAUTE FRÉQUENCE. — Les pertes d'énergie dans une installation de chauffage à haute fréquence comprennent d'abord la perte de chaleur subie par le corps que l'on chauffe; cette perte d'énergie, qui intervient dans ce que l'on peut appeler le *rendement calorifique* du four, dépend d'un très grand nombre de facteurs (température réalisée, nature et épaisseur du calorifuge, rapidité de chauffe) ; notons en passant que ce rendement calorifique sera d'autant meilleur que la température maximum sera plus rapidement atteinte ou l'opération de fusion plus rapide. En outre, interviennent les pertes dans le circuit de charge de la capacité (transformateur, self-induction de réglage) et les pertes dans le circuit de décharge (éclateur, enroulement du four, capacité) ; en réalité, les premières sont faibles par rapport aux dernières, et nous les négligerons. Nous considérerons uniquement ce que nous appellerons le *rendement électrique* du four, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie électrique recueillie sous forme de chaleur dans la substance conductrice et l'énergie électrique qui était emmagasinée dans la capacité.

» I. ETUDE THÉORIQUE DU RENDEMENT ÉLECTRIQUE. — Pour étudier le problème au point de vue théorique, il est bon de rechercher d'abord ce qui se passerait dans le cas d'un four alimenté par un

alternateur à haute fréquence, dont la fréquence reste fixe et indépendante de la réaction de la substance sur le circuit inducteur.

» Le calcul ⁽¹⁾ montre que, dans le cas des métaux solides ou fondus, pour lesquels l'épaisseur de la couche du skin-effect est faible, l'énergie recueillie dans la substance est proportionnelle au carré des ampères-tours efficaces et proportionnelle à la résistance électrique du cylindre conducteur pour les courants à haute fréquence utilisés: *toutes choses égales, cette énergie recueillie est proportionnelle au diamètre occupé par la substance dans le four, proportionnelle aussi aux racines carrées de la résistivité de la substance et de la fréquence du courant.*

» Pour des corps moins conducteurs, le calcul montre que, tou-

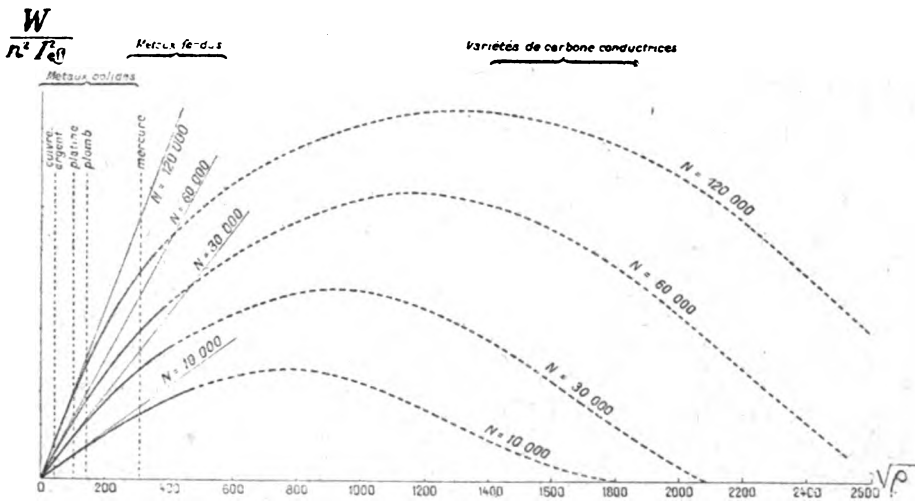


Fig. 6. — Énergie recueillie dans la substance en fonction de la résistivité et de la fréquence.

tes choses égales, il existe, pour une dimension de substance donnée, une valeur de la résistivité fournissant un maximum d'énergie recueillie, cette valeur optimum de la résistivité est d'autant plus grande que le diamètre de la substance et la fréquence du courant ont des valeurs plus grandes.

» Dans la figure 6, correspondant à des fours de quelques centimètres de diamètre, on a porté en abscisse la racine carrée de la résistivité, et en ordonnée, le rapport entre l'énergie recueillie et le carré des ampères-tours efficaces. Pour les métaux très conduc-

(1) Pour les détails de calcul, nous renvoyons à un article publié dans le *Journal de Physique*, juin 1923, t IV, p 185, par M. G. RIBAUD.

teurs (cuivre, argent), l'énergie recueillie est faible ; elle est notablement plus élevée pour les métaux fondus ; enfin, elle est maximum pour des résistivités voisines de celle du graphite.

» Le cas d'un four alimenté par une installation à étincelle est un peu plus complexe, il faut ici tenir compte de la réaction, nécessairement très importante, de la substance sur le circuit inducteur : cette réaction a pour effet de modifier, d'une part, l'intensité efficace dans le circuit de décharge ; d'autre part, la fréquence et l'amortissement des oscillations.

» Le calcul montre que, dans le cas des métaux solides et fondus, le rendement électrique du four a pour valeur :

$$\frac{n^2 r}{R + n^2 r'}$$

r désignant la résistance de la substance pour les courants de haute fréquence utilisés ; n , le nombre de tours de l'enroulement et R , la résistance totale du circuit de décharge (résistance équivalente de l'étincelle et résistance ohmique des conducteurs). Toutes choses égales, le rendement croît avec la résistivité de la substance et il est d'autant plus élevé que la résistance R du circuit de décharge est plus faible.

» II. ETUDE EXPÉRIMENTALE DU RENDEMENT. — Le rendement peut se mesurer très aisément par une méthode calorimétrique. Si le corps placé dans le four avait une chaleur spécifique bien connue, il suffirait de mesurer son élévation de température dans un temps donné. Il est préférable de placer le corps dans un calorimètre à eau à parois non conductrices de l'électricité, que l'on pourra constituer par un simple vase de verre reposant sur un support mauvais conducteur de la chaleur. L'eau, totalement isolante pour les courants de haute fréquence, ne perturbe pas les mesures. La méthode, très précise et très rapide, permet d'opérer avec des puissances réduites.

» Dans la suite, nous désignerons par H la hauteur de l'enroulement du four, par D son diamètre, par h et d la hauteur et le diamètre de la substance, de forme cylindrique, placée dans le four.

» Nous avons entrepris, par la méthode ci-dessus, l'étude systématique du rendement du four à haute fréquence à étincelles ;

le résultat des nombreuses mesures effectuées a été donné dans un article (1) dont nous allons résumer les parties essentielles.

» a) *Influence de la nature de la substance.* — Le tableau ci-dessous (tableau I) donne, pour un même temps, une même fréquence et une même puissance dépensée, les quantités de chaleur recueillies dans des cylindres de mêmes dimensions placés à l'intérieur du four.

TABLEAU I. — QUANTITÉS DE CHALEUR COMPARATIVES RECUEILLIES DANS DES CORPS DE RÉSISTIVITÉS DIFFÉRENTES.

Números des expériences	Substances	Résistivités (1) microhms-cm	Nombre de calories
1	Cuivre rouge.....	1,6	470
2	Laiton: cylindre plein.....	5	840
3	Laiton: tube de 1 mm d'épaisseur...	5	840
4	Plomb.....	20	1 950
5	Mercurc.....	95	2 250
6	Charbon pour arcs, cylindre plein..	3 000	2 600
7	Charbon pour arcs, cylindre creux de 2,5 mm d'épaisseur.....	3 000	1 950
8	Flombagine.....	mauv. conductrice	350
9	Fer.....	10	5 500

(1) Valeur des résistivités en courant continu; comme il s'agit de courants à haute fréquence, ces valeurs sont données à titre d'indication; au-dessus de la température de fusion, ces valeurs se modifieraient d'ailleurs de façon notable.

» Le rendement, on le voit, est maximum pour des corps de conductibilité moyenne et, circonstance heureuse, on s'écarte assez peu du maximum lorsqu'on passe de la résistivité du plomb à celle du graphite qui est 500 fois plus grande ; on retrouve bien, en outre, pour les métaux très conducteurs, la loi fournie par le calcul : proportionnalité entre l'énergie recueillie et la racine carrée de la résistivité.

» Les expériences 2 et 3 montrent que, pour une substance très conductrice, il revient au même de placer à l'intérieur du four un cylindre plein ou creux ; il n'en est pas de même pour le charbon (expériences 7 et 8), dans lequel l'épaisseur de la couche de skin effet à une valeur plus grande.

» Pour le fer (expérience 9) au voisinage de la température

(1) G. RIBAUD. *Recherches et Inventions*, janvier 1923, N° 40, p 25.

ordinaire l'échauffement est beaucoup plus rapide que pour les autres corps. Cette anomalie, qui tient aux propriétés du métal, disparaîtrait au-dessus du point de Curie.

» b) *Influence du diamètre et de la hauteur occupés par la substance dans le four.* — La figure 7 donne les valeurs des rendements obtenus avec un même four et des cylindres de diamètres différents faits d'une même substance conductrice. Pour les métaux, comme pour le graphite, l'énergie recueillie est très sensiblement proportionnelle au diamètre (résultat que nous fournit également le calcul); l'énergie recueillie croît en outre avec la hauteur h occupée par la substance dans le four (fig. 8).

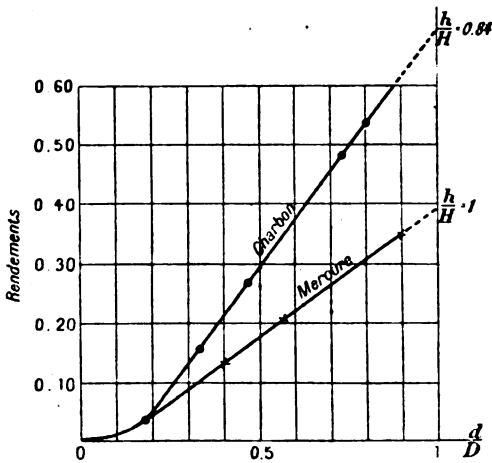


Fig. 7. — Rendement du four à haute fréquence en fonction du diamètre de la substance.

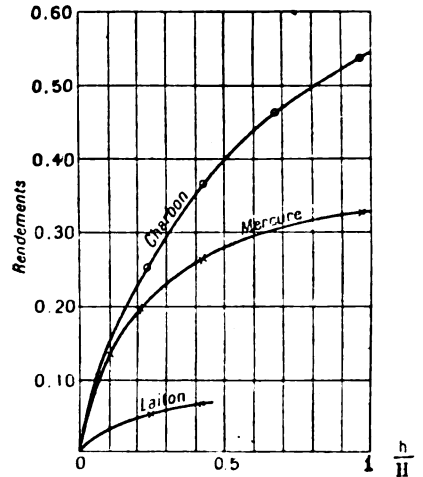


Fig. 8. — Rendement en fonction de la hauteur de la substance.

» Si l'on utilise tout l'espace intérieur du four ($\frac{h}{H}=1, \frac{d}{D}=1$), les rendements dépassent 70 pour 100 pour le charbon et 40 pour 100 pour les métaux fondus ; si la substance n'occupe que la moitié des dimensions du four ($\frac{h}{H}=\frac{1}{2}, \frac{d}{D}=\frac{1}{2}$), les rendements sont environ 3 fois moindres.

» Les nombres qui précèdent montrent que, pour les substances relativement peu conductrices, le procédé de chauffage direct par induction dans la substance fournit de bons rendements ; en revanche, le rendement sera moins bon pour les substances peu conductrices ou très conductrices (cuivre, argent, laiton) ; dans

tous les cas où la présence du charbon ne sera pas gênante on pourra tourner la difficulté en plaçant la substance à l'intérieur d'une enveloppe de graphite.

» Si l'on veut obtenir des températures élevées, il est nécessaire de disposer un isolant calorifique entre la substance et l'enroulement; on n'utilise alors qu'une partie du four et le rendement se trouve un peu diminué ; remarquons, d'ailleurs, en passant, que, pour une même température et par suite pour une même épaisseur d'isolant calorifique, le rendement sera d'autant plus élevé que l'on utilisera des fours de plus grands diamètres.

» L'épaisseur d'isolant calorifique fournissant le meilleur rendement pratique dépend de la température à atteindre; on doit en

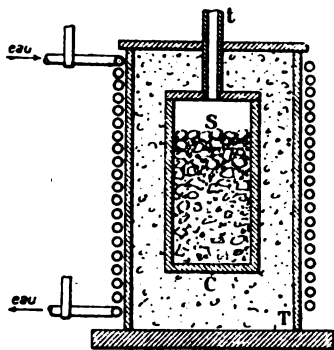


Fig. 9. — Four pour la fusion d'une substance conductrice.

outre la choisir d'autant plus grande que la conductibilité thermique du calorifuge est plus élevée.

» Avec le noir de fumée, qui est le meilleur isolant calorifique connu, il est possible d'atteindre, dans des creusets de graphite, des températures dépassant 2 500 degrés centésimaux avec des rendements dépassant 40 pour 100.

DESCRIPTION DES FOURS.

» 1. FOURS POUR LABORATOIRES. — Les fours destinés à des recherches de laboratoire sont constitués par un cylindre isolant T (quartz fondu) (fig. 9) autour duquel on enroule du tube légèrement aplati, de façon à resserrer le plus possible les spires, tout en permettant une facile circulation de l'eau de refroidissement.

» La substance conductrice est mise à l'intérieur d'un creuset réfractaire (non conducteur de l'électricité), l'espace entre le creuset et l'enroulement est rempli d'un isolant calorifique approprié (oxydes réfractaires préalablement calcinés à haute température).

» Si le corps à chauffer est peu conducteur ou trop conducteur (cuivre, argent, laiton), on améliore beaucoup le rendement en remplaçant le creuset C par un creuset de graphite, muni d'un brasquage approprié.

» Les mesures de températures très élevées se feront au pyromètre optique à travers un tube t ; pour des mesures de précision, on évitera la présence de fumées ou vapeurs en faisant circuler à l'intérieur de l'appareil un courant de gaz inerte, ce gaz entrant par le tube qui sert aux observations pyrométriques.

» Le four à induction à haute fréquence se prête remarquablement au chauffage dans le vide. La substance à chauffer sera enfermée dans un tube à l'intérieur duquel on maintiendra le vide ; les corps pulvérulents conviennent mal pour réaliser l'isolement calorifique ; ils présentent l'inconvénient de dégager de notables quantités de gaz au fur et à mesure qu'on les porte à haute température. Dans une installation pour la fusion, dans le vide et en l'absence de carbone, d'un très grand nombre d'alliages destinés à des recherches magnétiques (ferro-nickels, ferro-cobalts, nichromes), nous nous sommes contentés d'entourer le creuset de plusieurs enveloppes réfractaires successives qui assurent une protection calorifique suffisante. On trouvera sur la figure 10 le schéma de l'appareil. Le tube T en quartz fondu opaque est muni à sa partie supérieure d'une lame de quartz fondu transparent ou de pyrex, maintenue par un collage ou par une simple rondelle élastique ; la partie inférieure munie d'une garniture rodée L est fixée sur un plan de verre par collage ou plus simplement au moyen d'une rondelle de caoutchouc. Le creuset (alumine ou magnésie pure) contenant les constituants de l'alliage (métaux en grenaille) est placé sur des supports réfractaires (alundum) et entouré d'enveloppes à la partie supérieure desquelles on ménage des orifices O, O', O'', permettant les visées pyrométriques. Pour les températures élevées et pour des expériences de très longue durée, il y a avantage à utiliser, à la partie supérieure et à la partie inférieure, du tube T, des garnitures métalliques refroidies par une circulation d'eau.

» Il est difficile de donner des indications précises sur les tem-

pératures maxima réalisables dans de tels fours de laboratoire ; pour une même puissance, ces températures augmentent si l'on diminue les dimensions du creuset ; elles dépendent aussi de la nature de la substance conductrice chauffée et de l'isolant calorifique employé.

» Dans le cas le plus favorable de chauffage d'un creuset de graphite entouré d'une enveloppe de noir de fumée, une puissance de 20 kilowatts permet d'obtenir $3\ 000^{\circ}\text{C}$ environ dans des creusets de 100 cm^3 ; $2\ 500^{\circ}\text{C}$, dans un volume dépassant 300 cm^3 et

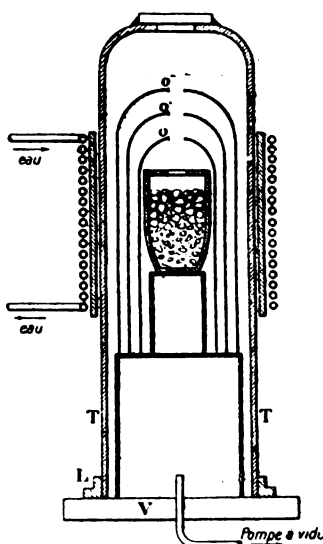


Fig. 10. — Four pour fusion dans le vide.

$2\ 000^{\circ}\text{C}$, dans un volume dépassant $1\ 000\text{ cm}^3$. La réalisation de températures dépassant $3\ 000^{\circ}\text{C}$ est limitée uniquement dans un tel four par la possibilité d'obtenir des enveloppes réfractaires résistant à de telles températures ; il n'y a en effet aucune impossibilité théorique à fondre, puis à volatiliser un métal très réfractaire, tel que le tungstène.

» II. FOURS INDUSTRIELS. — Dans le domaine industriel, le four à induction à haute fréquence a fourni dès maintenant des résultats du plus haut intérêt. Nous allons donner quelques indications sur les fours réalisés en Amérique par la firme Ajax, fours dont la puissance maximum individuelle atteint actuellement 105 kilowatts.

» La figure 11 donne le schéma d'un four à creuset monophasé de 25 cm de diamètre à sa partie supérieure et fonctionnant avec

20 kilowatts. Ce four, ainsi que les fours analogues de plus grandes puissances à chauffage direct, comporte un enroulement E de tube de cuivre fait sur un tube tronconique isolant G (quartz fondu ou micanite) ; la masse de métal à fondre A est placée à l'intérieur d'une enveloppe réfractaire convenable B, qui est séparée du tube extérieur par un isolant calorifique D. Le courant à haute fréquence est amené à l'enroulement par deux contacts F s'appuyant sur deux rails conducteurs, ou s'engageant dans deux parties métalliques tronconiques ; ces contacts électriques sont coupés automatiquement lorsqu'on bascule le creuset.

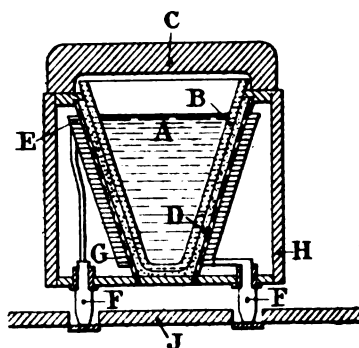


Fig. 11. — Schéma du four à creuset « Ajax » de 20 kilowatts.
A, métal à chauffer — B, revêtement réfractaire — C, couvercle — D, isolant calorifique — E, enroulement électrique parcouru par les courants de haute fréquence — F, contacts électriques coupant le courant quand on fait basculer le creuset — G, isolant électrique — H, enveloppe extérieure du four — J, table supportant le creuset et assurant les connexions avec la source électrique.

» Le creuset permet de fondre des masses de métal indiquées dans le tableau ci-dessous (tableau II).

TABLEAU II. — FUSION DE MÉTAUX DIVERS DANS LE FOUR A CREUSET
AJAX DE 20 KILOWATTS.

Métal	Charge en kilogrammes	Temps de fusion en minutes	Nombre de kilogrammes fondus par kilowatt-heure	Rendement pratique du four
Acier.....	13	54	0,7	0,20 (?)
Cuivre.....	15	22	2,1	0,37
Laiton.....	13	20	2,5	
Or.....	33	15	7	
Argent.....	18	14	4	0,40
Aluminium.....	4,5	14	1	0,26
Nickel.....	12	48	1,5	0,35
Zinc.....	12	6	6,5	0,56
Étain.....	12	2,5	15	0,47
Plomb.....	19	2,5	25	0,52

» Dans la dernière colonne, nous avons donné, pour les divers métaux, les valeurs approximatives du rendement pratique du four, c'est-à-dire du rapport entre l'énergie calorifique recueillie dans le métal (pour l'échauffer et le fondre) et l'énergie électrique fournie au four. Ces valeurs comportent une incertitude qui tient à ce que les chaleurs spécifiques à haute température et les chaleurs de fusion des métaux sont mal connues; elles montrent néanmoins ce que peut donner le chauffage direct dans un tel four. Il est bon de noter, comme nous l'avons fait plus haut, que le rendement pratique défini ci-dessus dépend, d'une part, du rendement électrique du four (c'est-à-dire de la résistivité de la substance) et, d'autre part, de la température de fusion du métal (les pertes de chaleur par conductibilité ou rayonnement croissant très vite avec cette température de fusion).

» Un four analogue au précédent, fonctionnant encore sous 20 kilowatts, mais de plus faibles dimensions (15 cm de diamètre à la partie supérieure) permet la fusion du platine et de l'iridium dans un creuset approprié (magnésie).

» Les fours Ajax fonctionnant sur secteur triphasé utilisent des puissances de 60 et 105 kilowatts ; plusieurs de ces fours sont en service dans l'industrie ; les ateliers de la Monnaie, aux Etats-Unis, utilisent actuellement pour la fusion des alliages monétaires 4 fours de 60 kilowatts, d'un type spécial.

» Nous allons décrire avec quelques détails un four industriel actuellement en service absorbant 60 kilowatts, fournissant un rendement de 60 à 70 pour 100 et permettant de fondre des masses d'argent de 275 kgr et les masses équivalentes de cuivre, laiton, bronzes ou autres métaux non carburables.

» L'alimentation de ce four se fait en branchant directement les capacités et les éclateurs sur les trois fils d'une ligne triphasée 6 600 volts (fig. 4). Le creuset, de 30 cm de diamètre, fait en graphite Acheson moulé ou tourné, est isolé électriquement de l'enroulement par un cylindre de micanite de 1 cm d'épaisseur ; l'espace entre le creuset et le cylindre extérieur de micanite est garni d'un isolant calorifique. Le circuit inducteur comporte trois enroulements de tube de cuivre groupés en étoile et parcourus par une circulation d'eau arrivant par l'axe de rotation du four.

» Le courant à haute fréquence est amené du convertisseur aux trois enroulements par trois contacts s'appuyant sur trois rails d'amenée, ces trois contacts sont coupés automatiquement lors-

qu'on bascule le four. Un tel four permet de fondre, en 8 heures de fonctionnement, 1 200 kg d'argent avec un rendement de 3,7 kg de métal fondu par kilowatt-heure; la durée d'une fusion est d'environ 2 heures lorsque le four est à la température ordinaire au début de l'opération ; cette durée est réduite à 50 minutes lorsque le four a été préalablement porté au voisinage de la température de fusion.

» Nous n'avons pu recueillir aucune donnée précise sur les fours triphasés de 105 kilowatts, que la firme Ajax a mis en service assez récemment.

AVANTAGES DES FOURS A HAUTE FRÉQUENCE.

» Le four électrique à induction à haute fréquence, nous venons de le voir, fournit, dans la plupart des cas, de très bons rendements, souvent supérieurs à ceux des fours de puissances voisines actuellement en usage dans l'industrie. La raison en est que la chaleur est développée à l'intérieur même de la substance et non pas apportée de l'extérieur, à travers des parois mauvaises conductrices, et aussi que la substance à chauffer n'est reliée à l'extérieur par aucun conducteur métallique ; on peut l'entourer complètement d'un isolant calorifique n'apportant aucune impureté. On sait qu'il n'en est pas de même dans le cas des fours à résistance ou des fours à arc, dans lesquels les pertes de chaleur par les électrodes d'amenée du courant sont toujours très notables ; on supprime d'ailleurs, par la même occasion, les très grandes difficultés que l'on rencontre pour réaliser les contacts d'entrée et de sortie du courant, et pour faire passer dans ces contacts de très grandes intensités : dans les fours à tube de carbone, par exemple, il n'est possible d'atteindre des températures de 2 500° C qu'après des durées de chauffe de plusieurs heures; le four à induction à haute fréquence permet d'atteindre en moins de 10 minutes les mêmes températures dans des volumes sensiblement plus élevés.

» Notons, d'ailleurs, que le four à haute fréquence convient très bien pour le chauffage et la fusion des métaux en morceaux; une étude systématique nous a montré qu'à condition de ne pas descendre au-dessous de certaines dimensions pour les morceaux de métal (1 mm de diamètre environ), le rendement conservait une valeur supérieure à celle que donne un cylindre continu. Cette

particularité, que ne présente pas, nous l'avons vu, le four à basse fréquence, est d'une très grande importance dans le cas du chauffage des métaux ou alliages fondant à des températures supérieures à celles des matières réfractaires usuelles. Dans le cas du tungstène, du molybdène et de leurs alliages, pour beaucoup d'autres métaux, d'ailleurs, la seule méthode applicable pour l'instant consiste à agglomérer sous très forte pression les poudres de ces métaux et à les chauffer ensuite par un courant électrique, de façon à souder ensemble les grains métalliques. Il est facile de se rendre compte que le four à haute fréquence convient remarquablement pour ce chauffage; il permet d'éliminer les multiples difficultés que présente, en particulier dans la métallurgie du tungstène, l'introduction du courant dans la masse conductrice à chauffer; il fournit en outre des échantillons très purs.

» La possibilité de calorifuger la substance sur tout son pourtour permet, en outre, la réalisation de températures très uniformes dans des volumes notables. Insistons aussi sur le fait que le four à haute fréquence se prête remarquablement au chauffage dans le vide.

» Tous ceux qui se sont servis du four à haute fréquence, concurremment avec d'autres modèles de fours, en particulier pour des recherches de laboratoires aux très hautes températures, sont frappés de la très remarquable souplesse du four à haute fréquence. Un même four peut servir indifféremment à chauffer, dans le vide ou dans telle atmosphère que l'on désire, des creusets de graphite ou de métal de dimensions variées, ou des substances conductrices placées dans des creusets réfractaires (alumine, magnésie, zircone); le changement de creuset nécessite quelques secondes seulement.

» Enfin, si l'on rapproche le four à haute fréquence de son proche parent, le four à basse fréquence, on se rend facilement compte des avantages qu'il présente sur ce dernier: la substance à chauffer est rassemblée sous forme grossièrement sphérique, condition favorable au point de vue des pertes de chaleur, enfin les dimensions du four ne sont pas hors de proportion avec celles de la substance comme cela se présente dans le four à basse fréquence; pour ces deux raisons, étant donné également sa plus grande souplesse, le four à haute fréquence semble devoir, dans beaucoup de cas, supplanter le four à basse fréquence.

RÉSULTATS ET APPLICATIONS DU FOUR A HAUTE FRÉQUENCE.

» Le four à induction à haute fréquence étant de mise au point très récente, les résultats obtenus dans ce type de four et publiés jusqu'ici sont encore en petit nombre. Les premières tentatives semblent avoir été faites en vue de la fusion de métaux ou alliages en l'absence complète de carbone, ou de métaux ou alliages difficilement fusibles (alliages de platine et d'or); nous avons indiqué plus haut qu'une installation à haute fréquence, réalisée à l'Institut de Physique de Strasbourg, dans le laboratoire de recherches magnétiques de M. Pierre Weiss, a servi jusqu'ici à la préparation, dans le vide et en l'absence de carbone, d'un très grand nombre d'échantillons d'alliages purs (ferro-nickels, ferrocobalts, nichromes, etc...). Nous avons signalé également l'emploi de ces fours dans l'industrie pour la fusion d'alliages, en particulier d'alliages monétaires. Ces fours conviennent également très bien pour la trempe et le recuit des pièces de fer de formes variées, pour la graphitisation d'objets en carbone amorphe, pour la fusion des verres, de la silice, des oxydes réfractaires et des émaux.

» Le four à haute fréquence n'en est encore qu'à la phase semi-industrielle; son adaptation aux très grandes puissances n'est pas encore faite, mais, en raison des multiples avantages sur lesquels nous avons insisté, ce four est susceptible de rendre dès maintenant de très grands services, en particulier dans la métallurgie des alliages spéciaux, des alliages et métaux très réfractaires; nous en avons la preuve dans les très nombreuses lettres provenant d'industriels que ce procédé nouveau intéresse.

» Bien que l'idée première du chauffage à haute fréquence soit née en France, l'Amérique nous a devancés dans ce domaine nouveau et son industrie compte déjà un très grand nombre de réalisations intéressantes. Notre industrie électrique française, qui a fait ses preuves, se doit de ne pas rester tributaire de l'étranger dans cette nouvelle application de l'électricité; nous ajouterons qu'en raison du change actuel la concurrence américaine n'est nullement à craindre sur notre marché: nous avons donné, dans notre exposé, des chiffres très significatifs à cet égard. »

LE PRÉSIDENT. — L'accueil fait par vous à la communication et aux expériences de M. Ribaud met en évidence l'intérêt qu'elles présentent. Les horizons qu'il nous ouvre sont des plus attirants, et nous lui serons reconnaissants de nous tenir dans l'avenir au courant de ses travaux.

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DE L'ORDRE DU MÈTRE.

Génération d'ondes électromagnétiques de l'ordre du mètre. — Propagation le long d'un fil. — Distribution des champs électriques et magnétiques. Polarisation du champ. — Réflexion. — Emission et réception.

M. MESNY. — On a réalisé depuis longtemps des ondes de l'ordre du mètre. Ce sont même elles qui ont été produites les premières par Hertz, en 1887, pour apporter la vérification expérimentale des idées de Maxwell, mais jusqu'à ces derniers temps elles n'ont pas franchi les limites du laboratoire.

» Quand Marconi eût trouvé le moyen d'appliquer les ondes électromagnétiques à des communications réellement pratiques sans fil, on utilisa d'abord des ondes de quelques centaines de mètres. Depuis cette époque, on eut toujours tendance à accroître les longueurs d'onde, tant pour franchir plus facilement les obstacles naturels en raison d'une diffraction plus importante, que pour utiliser des antennes plus grandes qui permettaient de mettre en œuvre des quantités d'énergie toujours croissantes.

» La réalisation aisée des ondes entretenues et l'invention des tubes électroniques apporta des modifications profondes dans la technique. Les communications furent assurées à des distances considérables avec des puissances relativement faibles et le développement des radiocommunications devint tel que l'on dut multiplier les longueurs d'onde en usage pour éviter les brouillages. On songea alors à en accroître la gamme du côté des ondes courtes.

» En même temps, les amateurs se multipliaient et, pour les satisfaire, on les autorisa à employer les ondes courtes, en général, inférieures à 300 mètres. Ils en firent un bon usage et, depuis deux ans, on a constaté la possibilité d'obtenir des communications de nuit à travers l'Atlantique, avec des puissances de 500 à 1 000 watts, sur des ondes de 200 à 300 mètres.

» Ces différentes considérations portèrent l'attention sur les ondes courtes, jusqu'alors considérées comme devant être d'un emploi très réduit et, un peu partout, on se mit à établir des émetteurs travaillant sur 200 mètres, puis sur 100 mètres.

» Avec ces ondes, des difficultés nouvelles se présentent : les antennes deviennent beaucoup moins développées, ce qui diminue la puissance qu'on peut emmagasiner, les capacités parasites jouent un rôle important, les montages à tubes électroniques deviennent capricieux.

» Il suffisait cependant de s'attaquer à ces obstacles pour les surmonter et, aujourd'hui, les ondes de 100 et 200 mètres sont devenues courantes.

» Il y avait intérêt à descendre encore beaucoup plus bas. Outre que la gamme utilisable s'allongeait, on pouvait espérer résoudre un problème capital pour les communications radiotélégraphiques : celui des *émissions dirigées*. Nous voulons parler des émissions concentrées dans un faisceau aussi étroit que celui d'un projecteur, et non de celles à directions favorisées, déjà produites depuis longtemps avec les cadres.

» Un des moyens les plus accessibles pour obtenir de telles émissions est l'utilisation des miroirs paraboliques, mais on peut montrer par le calcul et vérifier par l'expérience que, pour qu'un miroir remplisse les fonctions auxquelles il est destiné, il faut que ses dimensions atteignent environ 2 à 3 fois la longueur de l'onde à réfléchir.

» Ces nouvelles considérations conduisent à l'emploi d'ondes de quelques mètres seulement.

» Les ingénieurs anglais ont étudié cette question et sont parvenus à établir des émetteurs travaillant sur 4 mètres et pouvant envoyer des faisceaux électromagnétiques. ⁽¹⁾ Les Américains ont aussi publié récemment une série d'essais faits sur l'onde de 10 mètres. ⁽²⁾ En France, nous ne sommes pas restés en arrière, quoique rien n'ait encore été publié sur cette question.

» Nous nous proposons d'exposer, ce soir, les principes des recherches que nous avons faites avec M. David sur la question des ondes très courtes.

» Ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, une des difficultés de la production des ondes courtes est le fonctionnement capricieux des tubes électroniques sur ces ondes, et il semble qu'actuellement on ne puisse pas s'adresser à d'autres systèmes pour la production des courtes ondes entretenues.

» Nous avons eu recours à un montage à deux triodes symétriques, dont le principe est indiqué par le schéma de la figure 1. C'est un cas particulier d'un montage plus général permettant d'obtenir des oscillations polyphasées en haute fréquence que nous

⁽¹⁾ S.-J. MARCONI. *Radio Telegraphy* (Progrès récents au milieu de 1922). *Institution Radio-Engineers Proceeding*, août 1922, vol 10, p 215-239.

⁽²⁾ DUNMORE et ENGEL; Direction radio transmissions on a wave length of 10 meters. *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, 11 avril 1923, N° 469.

avons breveté en octobre 1921 ⁽¹⁾ en insistant sur le cas particulier du montage à deux triodes et sur ses avantages. Nous nous sommes aperçus depuis que ce dernier avait déjà été indiqué par Eccles en 1919 ⁽²⁾.

» Deux inductances G et P, enroulées en sens inverse, réunissent d'une part, les grilles; d'autre part, les plaques des deux triodes. Un condensateur variable est en parallèle avec chacune de ces inductances ; on le supprime pour obtenir les ondes les plus courtes. Les milieux des enroulements sont connectés à l'un des pôles

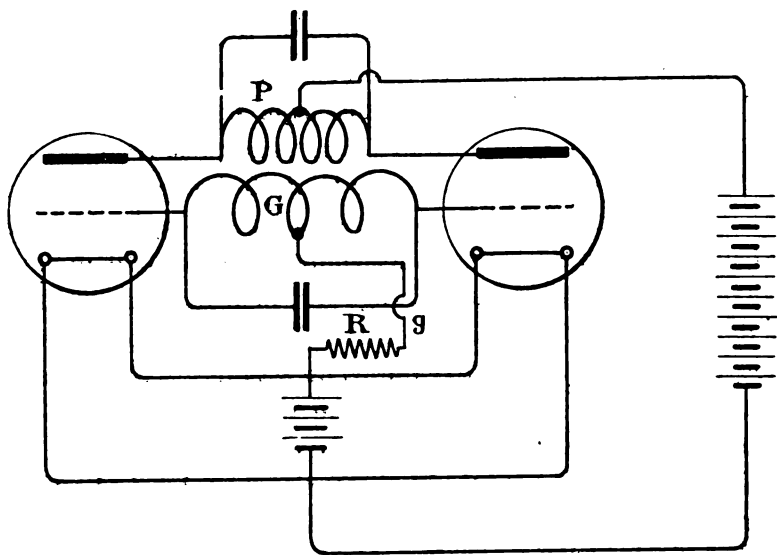


Figure 1.

du filament au moyen de deux fils g et p. Sur le fil des grilles, on interpose une résistance R de quelques milliers d'ohms, pour diminuer le courant continu filament-grille : dans le fil des plaques, on met en série une tension d'une centaine ou de quelques centaines de volts. Les éléments homologues des deux triodes sont alors, à chaque instant, à des potentiels égaux et de signes contraires et les oscillations sont cantonnées dans les inductances de grilles et de plaques et dans les fils conducteurs réunissant les filaments chauffés en parallèle. Aucun courant oscillant ne passe dans

(¹) MESNY; Génération et Réception d'oscillations polyphasées par tubes électroniques. Brevet français N° 552 227, 22 octobre 1921.

(²) ECCLES; The British Association Meeting at Bournemouth. *Radio Review*, novembre 1919.

les fils communs de grilles ou de plaques, et on peut disposer ceux-ci à volonté sans prendre aucune précaution. C'est là l'avantage de ce genre de montage sur les montages à un seul triode, dans lesquels les oscillations se propagent obligatoirement à travers les conducteurs réunissant le filament à la grille et à la plaque.

» Avec un seul triode, M. Gutton avait cependant obtenu, dès 1917, des ondes de 1,50 m; mais des précautions spéciales sont nécessaires pour obtenir des accrochages stables.

» Avec notre dispositif, nous avons d'abord réalisé des émetteurs travaillant sur des ondes voisines de 45 mètres. ⁽¹⁾

» En même temps, nous cherchions à obtenir des ondes aussi courtes que possible avec assez d'énergie pour qu'elles puissent être utilisées pour des communications pratiques. Avec les triodes ordinaires de réception utilisés par la Radiotélégraphie militaire, nous avons obtenu des oscillations très stables sur des ondes de 2 mètres ; nous pûmes aussi descendre jusqu'à 1,70 m, mais le fonctionnement devient alors irrégulier, et il est impossible d'obtenir de la puissance. En modifiant légèrement les plaques de ces triodes, nous avons atteint des ondes de 1,20 m et réalisé des fonctionnements très stables sur l'onde de 1,50 m. Avec deux triodes de cette espèce, nous avons mis 0,6 A dans une antenne vibrant en demi-onde et couplée inductivement avec les inducteurs du générateur ; cela correspond à une puissance rayonnée de 29 watts.

» La limite inférieure de la longueur des ondes que l'on peut engendrer est liée à la distance du filament à la plaque et à la grille, et à la tension employée. Si l'on calcule approximativement le temps nécessaire à un électron pour parcourir l'intervalle filament-plaque d'un triode de réception de la Radiotélégraphie militaire, on trouve, en effet, un nombre de l'ordre de grandeur de 10^{-8} à 10^{-9} seconde. Ce calcul est assurément très grossier, car on ne connaît pas exactement la distribution du champ dans les intervalles envisagés, mais les résultats ne seraient pas largement modifiés par une distribution différente de celle utilisée pour les obtenir. On constate, d'ailleurs, que, toutes autres choses égales, on doit augmenter la tension plaque à mesure que l'on

⁽¹⁾ Le commandant Chaulard et le capitaine Staut ont établi, près de Paris, un poste de ce type, d'une puissance de 700 à 800 watts, et ce poste est entendu très fortement à Nice et à Toulon.

vent accroître la fréquence des oscillations, et que les triodes dont la plaque, cylindrique, a le diamètre le plus faible, permettent d'obtenir les ondes les plus courtes.

» Quelle que soit la longueur de l'onde, la téléphonie se fait aussi facilement que la télégraphie ; le montage de la modulation est indiqué par la figure 2. C'est une application d'un principe breveté par M. Beauvais. (1) On remplace la résistance de grille par l'intervalle filament-plaque d'un triode dont on fait varier le potentiel de grille au moyen d'un transformateur alimenté par le microphone ; la modulation est excellente et les résultats ob-

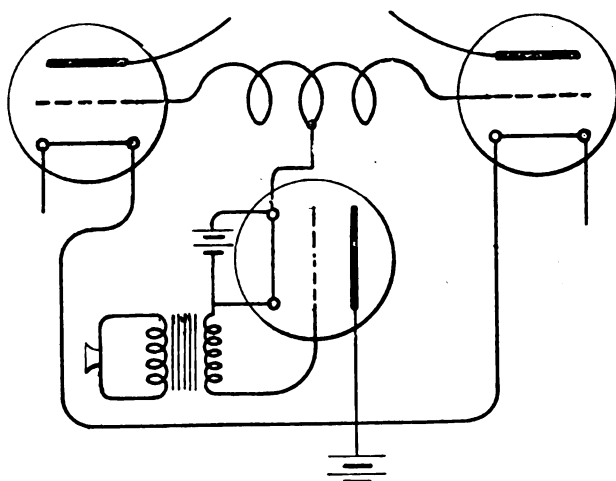


Figure 2.

tenus dans les communications sont comparables, quelle que soit l'onde utilisée. La réception peut se faire par les méthodes habituelles, la détection est possible par galène ou par lampe.

» Avec les ondes très courtes ainsi réalisées, il est facile de reproduire les expériences connues de propagation le long des fils et dans l'air, et de manifester la polarisation du champ et la production de nœuds et ventres par réflexion. Des miroirs paraboliques de 3 mètres d'ouverture donnent de bons faisceaux avec les ondes de 1,50 m. Ces expériences peuvent être quantitatives ; un thermo-élément intercalé dans une antenne vibrant en demi-onde

(1) Georges BEAUVAIS ; Perfectionnements apportés aux installations électriques, telles, notamment, que celles pour télégraphie et téléphonie à haute fréquence, comportant des lampes à trois électrodes destinées à engendrer des ondes entretenues dans un circuit oscillant. *Brevet N° 503 942*, 14 décembre 1917.

permet d'effectuer des mesures à des distances de plusieurs dizaines de mètres.

» Les phénomènes de diffraction sur objets voisins de l'émetteur et du récepteur sont très marqués. Avec les ondes de 1,50 m à 2 mètres, une personne produit des effets très curieux en se déplaçant autour du récepteur ; à des distances pouvant atteindre 1 ou 2 mètres, il existe des positions où la présence d'un homme peut annuler presque complètement le courant dans l'antenne de réception. Ces particularités ne sont cependant pas une gêne sérieuse dans la pratique de la réception. »

M. LE PRÉSIDENT. — Je remercie le commandant Mesny de son intéressant exposé et de ses expériences ingénieuses dans le domaine encore peu exploité des ondes électromagnétiques de l'ordre du mètre.

Après la séance d'aujourd'hui, consacrée aux hautes fréquences, nous aurons, le lundi 19 novembre, à 17 heures, une séance supplémentaire où M. Guillet nous parlera du résultat de ses recherches sur les alliages métalliques et leur résistivité et M. Valensi, des méthodes d'essai des appareils téléphoniques.

La séance est levée à 19 heures.

NOTE SUR LES TRAVAUX DE J. RENÉ BENOÎT EN ÉLECTRICITÉ, par M. JOUAUST.

« Bien qu'il eut fait sa thèse de doctorat au laboratoire de Jamin sur la détermination de la résistivité des métaux et que, au début de sa carrière, il eût été attaché au laboratoire des usines Ratier, Benoît avait, depuis son entrée au Bureau international des Poids et Mesures, en 1878, tourné son activité vers des branches de la physique différentes de l'électricité.

» A la suite de la Conférence internationale des Unités électriques de 1832, Mascart entreprit une étude pour déterminer, en valeur absolue, la valeur des résistances de la British Association. Mais n'ayant pas confiance dans la constance des bobines de maillechort, qui constituaient ces étalons, il voulut rapporter ces mesures à des résistances présentant plus de garanties de durée, et il choisit la résistance des colonnes de mercure en tube de verre, comme l'avait proposé depuis un certain temps déjà Werner Siemens.

» Le problème que se posait l'illustre Mascart comprenait donc deux parties : déterminer par rapport à l'ohm absolu la résistance d'une colonne de mercure contenue dans un tube de verre et déterminer exactement les constantes géométriques de la colonne mercurielle.

» C'est pour s'occuper particulièrement de cette deuxième question que Mascart et son collaborateur, M. de Nerville, s'associèrent Benoît, que ses travaux antérieurs sur le calibrage des tubes thermométriques désignaient particulièrement pour cette étude.

» Non seulement Benoît s'occupa de la réalisation des résistances en mercure, mais, pour la comparaison de ces résistances entre elles et aux étalons métalliques de la British Association, M. de Nerville et lui apportèrent à la méthode du pont à fil d'importants perfectionnements.

» Les trois physiciens arrivèrent à cette conclusion que l'ohm absolu pouvait être représenté par la résistance à 0° C d'une colonne de mercure ayant 1 millimètre carré de section et une longueur de 106,33 cm. Les résultats les plus récents conduisirent à une longueur de 106,28 cm. Malheureusement, toutes les mesures effectuées simultanément par d'autres physiciens ne comportaient pas la même exactitude que celle des trois savants français. Devant la discordance des résultats, la session de 1884 de la Confé-

rence pour les unités électriques fut amenée à définir l'ohm comme la résistance à 0° C d'une colonne de mercure de 106 cm de longueur et d'un millimètre carré de section. Telle est l'origine de l'ohm, dit légal, qui fut utilisé pendant un certain nombre d'années.

» L'ohm étant ainsi défini, il était nécessaire, pour chaque pays, de construire des étalons se rapportant à cette définition.

» Pour la France, M. Cochery, alors ministre des Télégraphes, chargea de ce travail Benoît, qui construisit quatre étalons prototypes. Le Comité international des Poids et Mesures, dont il dépendait de par ses fonctions au Bureau des Poids et Mesures, voulut bien l'autoriser à entreprendre ce travail en dehors des attributions du Bureau et à utiliser pour ses mesures les appareils du pavillon de Breteuil. La réalisation de ces étalons représenta un labeur considérable. Tandis qu'un certain nombre de physiciens, qui dans la suite entreprirent un travail identique, se bornèrent à prendre des tubes quelconques, à les mesurer et à déterminer leur résistance, Benoît s'imposa de réaliser des étalons aussi conformes que possible en tous points à la définition.

» Le détail des opérations, auxquelles conduisit la construction des quatre étalons, est exposé dans un ouvrage, édité en 1885, par le soin du Ministère des Postes et Télégraphes : « Constructions des étalons prototypes de résistance électrique ».

» Ainsi, grâce à Benoît, la France était dotée, dès 1885, de quatre étalons prototypes de l'ohm légal. Pareil travail ne fut entrepris en Allemagne qu'en 1890, en Angleterre qu'en 1903.

» Mais en 1893, le Congrès de Chicago avait donné une nouvelle définition de l'ohm : résistance à 0° C d'une colonne de mercure de 106,3 cm de longueur et ayant une masse de 14,4521 grammes. Aussi, lorsqu'au moment du Congrès de Saint-Louis, en 1904, la question des unités électriques fut soulevée de nouveau, Benoît émit-il l'opinion qu'il convenait de refaire de nouveaux étalons conformes à la nouvelle définition. Il estimait, en outre, que les progrès faits par la métrologie depuis 1885 devaient permettre d'obtenir une beaucoup plus grande précision dans la réalisation de ce travail.

» Sur les instances de Mascart, il consentit à entreprendre cette nouvelle construction.

» Mais ce travail était totalement étranger aux occupations du Bureau international des Poids et Mesures. C'est à titre privé que

Benoît l'entreprit. Il ne disposait d'aucun crédit. C'est la Société française des Electriciens qui lui fournit les fonds nécessaires. Le travail était presque terminé en 1908, mais certaines spécifications fixées par la Conférence internationale des Unités, à Londres, obligèrent Benoît à reprendre presque entièrement ses opérations. Nous ne pouvons insister sur toutes les précautions prises par Benoît. Signalons qu'il imagina un procédé pour redresser les tubes généralement courbés en cours de fabrication, qu'il employa pour mesurer leur longueur un nouveau procédé, la méthode d'Airy. En 1913, dix étalons étaient, enfin, construits et transportés au Laboratoire central d'Electricité, où devait avoir lieu le remplissage et les comparaisons. Benoît dirigea lui-même la première opération et les comparaisons allaient commencer lorsque la guerre éclata.

» Le personnel du Laboratoire, presque entièrement mobilisé, dut abandonner ces mesures.

» On se borna à prendre des précautions pendant les divers bombardements de Paris, pour mettre à l'abri les précieux tubes calibrés, et ce n'est qu'en 1919 qu'il fut possible de reprendre l'étude des étalons. Un nouveau remplissage fut jugé nécessaire et effectué toujours sous la direction de Benoît.

» Puis les comparaisons commencèrent ; opérations assez longues, dont Benoît ne devait pas voir la fin, car elles ne furent terminées que quelques jours après sa mort.

» Il vécut pourtant assez pour connaître les premiers résultats des mesures électriques et savoir qu'elles confirmaient complètement les résultats de ses mesures géométriques. »

INFORMATIONS

PRIX TRIENNAL DE LA FONDATION GEORGE MONTEFIORE.

Le Jury de ce prix triennal, dont les membres français sont MM. Blondel, Boucherot et Langevin, s'est réuni, sous la présidence de M. le professeur Omer de Bast, les 29 et 30 septembre, à l'hôtel de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut de Montefiore.

Après délibération, le Jury conclut à l'unanimité qu'il y avait lieu de primer les mémoires de M. Fernand Campus, ingénieur, directeur technique de la Commission interalliée du gouvernement de la Sarre, sur « les calculs graphiques des réseaux de distribution d'énergie électrique », et de M. Thielemans, ingénieur de la Compagnie française pour l'Exploitation des Procédés Thomson-Houston à Paris, sur « les calculs, diagrammes et la régulation des lignes à transport d'énergie à longue distance », et de fixer le montant de chacun de ces prix à 4 000 francs. Un prix exceptionnel de 4 000 francs a, en outre, été attribué à M. Wladimir Karapetoff pour ses divers mémoires.

Au cours des débats, plusieurs membres du Jury ont formulé le regret de constater la tendance actuelle, chez la plupart des auteurs des mémoires, à négliger le côté physique des questions traitées, pour s'attacher surtout aux développements purement mathématiques.

Le prochain concours a été fixé à 1925 et comportera un prix de 22 500 francs.

ACTIVITÉ DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEER

JOURNAL DE JUILLET 1923. — Communication du Secrétariat sur « Le Rapport des tensions continue et alternative considéré spécialement pour les essais de câbles au papier imprégné ».

Le rapport des tensions qui déterminent la rupture de l'isolant dépend de conditions multiples :

1° Durée d'application de la tension;

2° Nature de l'isolant;

3° Température;

4° Epaisseur de l'isolant. Cette dernière condition est considérée comme douteuse.

Pour les câbles imprégnés et pour des durées trop courtes pour que la perte diélectrique moyenne affecte la résistance de l'isolant, les valeurs de ce rapport sont :

1,4 pour l'huile liquide;

1,8 pour les câbles au papier imprégné à 100° C;

2,4 — — — à 25° C.

Le chiffre de 2,4 a été confirmé : par M. Weiset (*E. T. Z.*, 15 janvier 1920), opérant avec un contact tournant Delon; par M. Delon lui-même (par correspondance); par M. William Clark (16 août 1922).

Certains résultats d'essais en fabrication courante sembleraient indiquer que le rapport en question dépend de la compacité des fibres du papier qui tend à immobiliser l'huile.

Cette immobilisation serait de nature ionique (Del Mar et Hanson, *J. A. I. A. E. E.*, juin 1922) et jouerait un rôle prépondérant dans la fixation de la valeur du rapport.

Cette compacité variant beaucoup d'une fabrication à l'autre, il peut être dangereux d'adopter uniformément la valeur de 2,4.

Phelps et Tanger (*J. A. I. E. E.*, mai 1923) indiquent que la solution doit être cherchée en observant la manière dont l'isolant se comporte sous une tension continue relativement basse.

Tous renseignements envoyés au Secrétariat du Comité de l'A. I. E. E. seront les bienvenus.

Le Secrétariat de la Société française des Electriciens est disposé à transmettre à celui de l'A. I. E. E. les renseignements qui lui seraient fournis.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES. SECTION DE L'ART DE L'INGÉNIEUR. — Cette Section publie chaque mois un résumé des progrès réalisés sur des questions déterminées, des questions nouvelles mises à l'étude et des méthodes qui leur sont appliquées.

Le journal de juillet mentionne à ce titre la question suivante : *Isolement électrique.*

Objet : Etablir les bases fondamentales de l'étude des isolants permettant de donner une solution aux problèmes que pose la pratique.

Méthode adoptée :

(1) Dresser une liste des questions générales et particulières concernant les isolants et relevant de l'expérience.

(2) Faire une étude critique des meilleures sources de renseignements concernant chaque question; réunir les résultats déjà acquis pour servir de base à de nouvelles recherches.

(3) Répartir l'étude entre les laboratoires et les expérimentateurs particuliers; stimuler le travail par des conférences ou de toute autre manière.

Progrès réalisé :

En juin 1923, le journal a publié une mise au point complète de la question donnant l'historique, les fonctions, les propriétés des isolants et une méthode d'étude pour les problèmes non encore résolus.

JOURNAL D'AOUT 1923. — RÉUNION DE SWAMPSCOTT, MASSACHUSETTS, 25-29 JUIN 1923. — Le nombre total des membres présents à cette réunion a atteint 1 623, dépassant ainsi tous les précédents.

Il a été tenu six séances techniques.

Les travaux des séances se développèrent comme suit :

Première séance :

Charge et décharge des câbles. Steinmetz.

Rapport des tensions descriptives entre le courant alternatif et le courant continu. Hayden et Eddy.

Etude géométrique des câbles et calcul de leur capacité de transmission. Simons.

Deuxième séance :

Caractéristiques de l'usine génératrice de Weymouth. Moulthrop et Pope.

Refroidissement des machines électriques. Lake.

Convection libre et convection forcée de la chaleur dans les gaz et les liquides. Rice.

Troisième séance :

Station électrique de radiotélégraphie transocéanique. Alexander, Reoch et Caylor.

Radiotéléphonie transatlantique. Arnold et Espenchied.

Mesure de la fréquence dans les communications électriques. Horton, Ricker, Marrison.

Équipement téléphonique pour câbles à longue distance. Demarest.

Haut-parleurs électriques. Nyman.

Quatrième séance :

Au début de la séance, le Président Jewett annonça que l'Institute avait été honoré de trois adresses envoyées par des Sociétés étrangères : l'Institution of electrical Engineers, l'Associazione elettrotecnica Italiana et la Société française des Electriciens.

Les délégués de ces trois Sociétés lurent respectivement ces adresses. M. Leblanc représentait la Société française des Electriciens.

Les travaux techniques furent repris dans l'ordre suivant :

Lignes artificielles de transmission. Dellenbough.

Changements de régime dans les lignes de transmission. Bush.

Considérations générales sur les lignes artificielles du type en T et en II. Nukigoma et Okabe.

Système de transmission en miniature pour la solution pratique des divers problèmes rencontrés dans les réseaux. Schecrig.

Méthode simplifiée pour l'étude des problèmes se présentant lors des court-circuits. Doherty.

Effets d'induction dans les fils et les tubes minces. Dwight.

Neutre flottant. Doggett.

Cinquième séance :

Qualité des lampes à incandescence. Howell.

L'art de sceller dans le verre les électrodes métalliques. Houskeeper.

Unification des instruments de mesure électriques. Brooks.

Parafoudre à pellicule d'oxyde, type Pellet. Longee.

Génératrice de courants continus à haute tension. Bergman.

Doublements et sécurités désirables dans l'équipement électrique d'une station centrale. Sims.

Sixième séance :

Ionisation gazeuse dans les isolants synthétiques. Whitehead.
Magnetron à contrôle axial. Hull.

Effet des tensions transitoires sur les diélectriques. Peck.

Deux méthodes photographiques pour l'étude des décharges à haute tension. Mac Eochron.

En dehors des séances techniques ordinaires, le professeur Karapetoff fit une conférence sur la relativité, accompagnée de la présentation d'un modèle servant à démontrer quelques conclusions de ses calculs.

Le professeur 'Hbagnusson présenta des projections en couleur sur les Montagnes du Nord-Ouest et les accompagna d'une conférence sur les possibilités de développement hydroélectrique présentées par cette région.

Dans une séance spéciale furent présentés les rapports du Comité technique, chacun d'eux mettant au point les récents progrès accomplis dans leur domaine respectif.

A un déjeuner des anciens présidents, qui réunit vingt-quatre d'entre eux, il fut décidé de célébrer, l'an prochain, le 40^e anniversaire de la fondation de l'Institute.

Le professeur Karapetoff, savant doublé d'un virtuose, donna un récital de piano avec conférence.

Le capitaine Belknap fit une conférence sur les mines sous-marines et sur le rôle qu'elles jouèrent pendant la guerre.

Le capitaine Gove fit exécuter sur la plage, devant l'hôtel où étaient réunis les congressistes, une manœuvre de sauvetage.

Des projections cinématographiques et stéréoscopiques occupèrent une soirée et, pendant chacune des autres, les sociétaires et les habitants de Swampscott purent entendre, sous le flot des illuminations variées et intenses, les orchestres de Boston et d'autres villes voisines.

De nombreuses visites et excursions en automobile furent faites aux lieux intéressants et aux usines de la région.

Mentionnons seulement celle du Watertown Arsenal où l'on montra aux visiteurs les laboratoires équipés pour l'examen par rayons X et les fours électriques où s'élabore l'acier destiné à la fabrication des grosses pièces d'artillerie.

La fête fut complétée par d'innombrables séances de jeux et de sports : bridge, golf, baseball, etc.

ASSEMBLÉE DES DÉLÉGUÉS DE SECTIONS. — La veille de l'ouverture du Congrès, les délégués des Sections locales avaient tenu deux réunions, pour passer en revue les travaux exécutés ou en cours. Ces réunions étaient ouvertes à tous les membres de la Société à titre consultatif.

Un programme des questions mises en discussion avait été envoyé aux délégués de chaque section assez à temps pour qu'ils aient pu prendre l'avis de leurs collègues.

Le président sortant, M. Berresford, fit remarquer qu'à chacune des quatre réunions générales annuelles tenues par l'A. I. E. E., il était présenté un trop grand nombre de communications et il suggéra qu'à l'avenir la plupart de ces communications fussent présentées aux Sections. Il fut ensuite décidé que, pour ne pas engager la responsabilité de l'A. I. E. E., toute publication ou communication faite hors de la Société, des travaux des Sections, serait accompagnée de la mention suivante :

« L'A. I. E. E. étant une organisation nationale, les opinions et recommandations mentionnées ci-dessous ne représentent que les vues particulières de la ... section. »

La modification reproduite ci-après touchant le mode de publication dans le journal et dans les transactions des communications trop longues ou d'un caractère trop mathématique fut adoptée par les délégués.

Un vœu fut adopté, demandant au Bureau de réunir tous les ans le Comité exécutif de chaque district et de rembourser leurs frais de voyage.

Ce Comité exécutif de district comprend le vice-président du district, le président et le secrétaire de chaque section.

L'expérience déjà faite par quelques comités de district a montré la grande utilité de ces réunions.

Un résumé des discussions intervenues dans cette Assemblée sera envoyé à tous les délégués et à ceux des membres qui en feront la demande.

Le Bureau, comprenant entre autres membres les anciens présidents de l'A. I. E. E., adopta le projet de constitution d'un service coopératif de placement, à organiser entre les quatre principales sociétés d'ingénieurs américains.

Ce service, s'il atteint le plein développement que prévoient

ses fondateurs, sera ouvert aux seuls membres de l'une des quatre sociétés.

Les ingénieurs en quête de place se feraient inscrire sur une liste permanente.

Ils recevraient individuellement l'indication des emplois disponibles, qui cesserait de figurer au bulletin des sociétés intéressées.

Les employés chargés du service se renseigneraient exactement sur la situation offerte et sur la personnalité du demandeur de place.

Ils auraient aussi pour mission de chercher à élargir le champ des emplois possibles en s'informant si des ingénieurs ne seraient pas indiqués pour remplir des places encore occupées par des « laïques ».

Pour la mise en œuvre de l'organisation, chacune des sociétés aurait à garantir un versement proportionnel au nombre de placements effectué par elle au cours de l'année précédente ; mais elle ne verserait effectivement que la moitié de cette somme.

En outre, chaque demandeur d'emploi aurait à verser dix dollars pour une place comportant des appointements de deux mille dollars ou au-dessous et 1 0/0 du chiffre dépassant cette somme.

Cette mesure assurerait effectivement au Bureau coopératif un revenu d'environ 30 000 dollars pour la première année.

NORMALISATION DU MATÉRIEL. — LIGNES AÉRIENNES. — L'Association des Chemins de fer américains vient de soumettre ses règles de spécification pour le matériel des lignes aériennes à un Comité chargé de les mettre en concordance avec les spécifications du Comité américain de Normalisation. La Rédaction du journal se félicite grandement de l'attitude ainsi prise par l'Association des Chemins de fer.

JOURNAL DE SEPTEMBRE 1923. --- NORMALISATION. — Le Comité de normalisation a adopté la traduction en espagnol des règles A. I. E. E. Cette traduction, qui a été au préalable adoptée par le Bureau, va être publiée par le Ministre du Commerce des Etats-Unis.

Les spécifications préparées par l'Association des Chemins de fer américains pour la construction du trolley aérien, à courant continu 600 volts, ont été approuvées par le Comité de normali-

APR. 2 1924

TOME III. (4^e SÉRIE.)

N^o 30.

DÉCEMBRE 1923

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAEL
PARIS (15^e)

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 60 fr. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 64 fr.
Prix du numéro : 8 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de Poste.

PARIS
SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
ÉDITEUR
12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e

1923

Ce Recueil paraît chaque mois

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

Société Anonyme au Capital de 70 Millions de francs

Reg. du Commerce : Seine 70 708.

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au **BOURGET** (Seine), au **HAVRE** et à **LYON**

Agences à **BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES**

TURBINES A VAPEUR

(Système Brown-Boveri)

Pour la Commande de :

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines

installées en **France**

par la **Compagnie Electro-Mécanique**

et ses Licenciés,

plus de 1200 000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

(Procédés Brown-Boveri)

Stations centrales.

Transports d'énergie.

Traction électrique par courant continu et par courant alternatif.

Eclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

C^{IE} GÉNÉRALE ELECTRIQUE

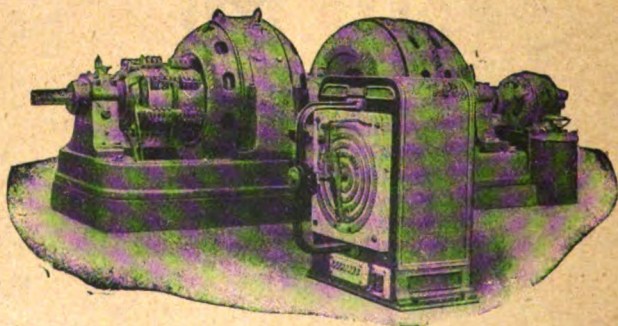
Capital 20 Millions de Francs.

Siège social : **NANCY, Rue Oberlin**

Reg. du Commerce : Nancy 251.

Usines à : **NANCY, PARIS-JAVEL, NANTERRE NANTES**

Bureaux de **PARIS : 26, Rue Lafayette (IX')**



Groupe convertisseur pour la commande d'un treuil d'extraction.

Matériel électrique et électromécanique.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE (*)

COMPTE RENDU DES RÉUNIONS :

Réunion supplémentaire du 19 novembre 1923, p. 630.

Réunion ordinaire mensuelle du 1^{er} décembre 1923, p. 633.

Admission de membres titulaires, p. 633. Membres décédés, p. 633.

NÉCROLOGIE : M. Violle, par M. VILLARD, p. 637.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS :

Recherches sur la résistivité des produits métallurgiques (M. LÉON GUILLET), p. 641. — Recherches faites au Laboratoire central d'Electricité sur les propriétés de l'aluminium (M. JOUAUST), p. 663. — Méthodes d'essais des appareils téléphoniques (M. VALENSI), p. 671. — Discussion (MM. RAYUT, CAHEN, JANET, COURTOIS, VALENSI), p. 699. — Sur les ampoules à rayons X, observations sur la communication de M. JOHANNÈS (M. VILLARD), p. 723. — Réponse aux observations précédentes (M. JOHANNÈS), p. 727. — Diagramme Scott pour les connexions des transformateurs (M. STORVIS), p. 729.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS :

1^o Création d'une médaille d'honneur triennale, dite Médaille Mascart, p. 751.

2^o Affectation des legs en 1923, p. 751.

3^o Organisation d'essais contrôlés d'appareils d'appel de T.S.F. pouvant être utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie, p. 751.

4^o Compte rendu de la visite faite par la Société au Laboratoire Ampère à 1 million de volts de la Compagnie générale d'Electro-Céramique, p. 752.

5^o Compte rendu des visites faites par la Société à l'Exposition de Physique et de T.S.F., p. 753.

6^o Travaux des Sections du Comité en novembre, p. 756.

7^o Rappel des principales décisions prises en 1923 par le Comité et par l'Assemblée générale de la Société, p. 764.

ÉCHOS DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES, p. 766.

BIBLIOGRAPHIE, p. 781.

IL Y A TRENTÉ ANS, p. 787.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE TOME III (4^e SÉRIE), p. 783.

TABLE DES NOMS D'AUTEURS CITÉS DANS LE TOME III (4^e SÉRIE), p. 805.

(*) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

COMPTE RENDU DES RÉUNIONS

RÉUNION SUPPLÉMENTAIRE

du lundi 19 novembre 1923

Présidence de M. P. ESCHWÈGE

La séance est ouverte à 17 heures.

M. le Président prononce les paroles suivantes : « Nous vous avons convoqués à une séance supplémentaire pour entendre deux communications qui n'avaient pu trouver place dans les séances ordinaires et qui vont être faites par M. GUILLET et M. VALENSI.

Je n'ai pas à vous présenter M. Guillet. Comme professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers et à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, puis comme président de la Société des Ingénieurs civils de France, il a toujours tenu dans la métallurgie, cette industrie si voisine de la nôtre, une place prépondérante. »

M. Guillet présente sa communication qui est publiée au présent Bulletin et est intitulée : « Les recherches sur la Résistivité des produits métallurgiques. »

Il la divise en trois parties.

Dans la première, il étudie les relations entre la résistivité et la constitution des alliages, et montre l'influence que peut avoir, dans certains cas, l'écouissage.

Il résume ensuite ses recherches sur la conductibilité de l'aluminium, l'influence des impuretés et des traitements.

Enfin, il donne le résultat de ses travaux sur la désoxydation du cuivre et montre que le carbure de bore, dont il a été si souvent parlé, n'a d'action intéressante qu'en présence du fer, et que celui-ci suffit seul à obtenir des résultats.

Toutefois, il ne faut pas qu'il y en ait un excès qui nuirait à la conductibilité.

M. Jouaust expose ensuite les recherches faites par le Laboratoire central d'Electricité, à la demande du Comité électrotechnique français, *sur les propriétés de l'aluminium*.

Cette communication est reproduite in-extenso au présent Bulletin.

M. le Président se fait l'interprète de la Société pour remercier

M. Guillet de sa très importante communication. Le jour paraît venu pour l'industrie électrique de bénéficier des travaux de M. Guillet comme le fait depuis vingt-cinq ans l'industrie métallurgique.

La Société lui en exprime toute sa reconnaissance.

M. le Président remercie aussi M. Jouaust d'avoir apporté à la Société le résultat des recherches que, parallèlement à celles de M. Guillet, il a poursuivies au Laboratoire central d'Electricité avec tant de conscience et de soins.

Il prie ensuite M. Lebaupin de le remplacer au fauteuil de la présidence.

M. le Président donne la parole à M. Valensi, ingénieur des Postes et Télégraphes, qui expose sa communication sur les diverses méthodes d'essais des appareils téléphoniques actuellement employées par l'Administration des Postes, Télégraphes et Téléphones.

Après avoir décrit les méthodes qui permettent de se rendre compte si un appareil possède les qualités nécessaires pour assurer un bon service, M. Valensi rappelle quelles doivent être ces qualités et il indique l'ordre de grandeur des dépenses supplémentaires de lignes à envisager quand les appareils sont défectueux.

La discussion est ensuite ouverte.

M. Ravut expose, sous forme mathématique, les raisons qui le font douter de l'exactitude des méthodes employées si, au lieu de les limiter à des appareils de type donné essayés dans des conditions déterminées, on généralise leur application.

M. Cahen regrette que l'Administration des Postes, Télégraphes et Téléphones ait adopté une unité de mesure étrangère au système métrique et objecte à l'emploi du câble étalon, qu'il cause une distorsion plus grande que les lignes ordinaires.

M. Janet appuie l'observation de M. Cahen relative à l'emploi du mile comme unité, et M. Courtois demande si les essais pratiques suivant les méthodes qui ont été indiquées permettent de constater, sur certains appareils, une efficacité supérieure à celle de l'étalon.

M. Valensi répond que l'adoption du mile comme unité est provisoire et qu'une Conférence plénière internationale fixera, en 1924, l'unité définitive.

Il reconnaît qu'il serait désirable de pouvoir, dans les mesures de comparaison, substituer aux opérateurs, dont le coefficient personnel peut influencer sur le résultat, des appareils alimentés par une source de courant alternatif étalonnée : mais la forme du courant téléphonique est imparfaitement connue et les caractéristiques des appareils à lampes ne sont pas assez constantes pour permettre la mesure exacte d'intensités de l'ordre du microampère et de puissances de l'ordre du microwatt.

Les mesures, telles qu'elles sont faites actuellement, ont permis de mettre en évidence que la qualité de certains appareils est supérieure à celle de l'étalon. Les mesures portant sur les microphones isolés n'ont d'autre but que la comparaison d'appareils d'un même type et l'impédance au départ, dont l'influence est prédominante sur les pertes par réflexion est à peu près la même pour l'unité de câble étalon que pour une ligne réelle.

La communication de M. Valensi et la discussion qui l'a suivie sont reproduites in extenso ci-après.

M. le Président remercie M. Valensi d'avoir exposé aussi clairement les méthodes employées par l'Administration. Il remercie de leurs observations MM. Ravut, Cahen, Janet et Courtois.

Il paraît résulter de cette discussion que si les méthodes employées par l'Administration ne donnent pas encore la solution complète du problème posé, elles paraissent du moins être les meilleures possibles dans l'état actuel de l'industrie téléphonique.

La séance est levée à 19 h 30.

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du samedi 1^{er} décembre 1923

Présidence de M. P. ESCHWÈGE

La séance est ouverte à 17 heures.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

- Catoni** (Angle-Jean), ingénieur aux Bétons armés Hennebique, 20, rue Pestalozzi, à Paris (5^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- David** (Pierre-Bernard-François), ingénieur, Radiotélégraphie militaire, 51, boulevard de la Tour-Maubourg-56, rue de Vaugirard, à Paris (6^e). — Présenté par MM. Mesny et Jouaust.
- Fallou** (Jean-Gustave), ingénieur chargé du service technique électrique à l'Union d'Electricité, 137, rue Saint-Charles, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Houzez** (Lucien-Jules-Arthur), ingénieur, administrateur des Constructions électriques du Nord, 21, rue du Fresnoy, à Tourcoing (Nord). — Présenté par M. Beghin et Renard.
- Maisonneuve** (Henry-Eugène), ingénieur à la Compagnie des Lampes, 19, rue Poussin, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Larnaude et Lebaupin.
- Nageotte** (Eugène), ancien élève de l'Ecole polytechnique, élève à l'E. S. E., 82, rue Notre-Dame-des-Champs, à Paris (6^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Varangot** (Georges-Victor), ingénieur E. P. C. I., directeur du Service commercial de la Compagnie des Lampes, 15, rue Pergolèse, Paris (16^e). — Présenté par MM. Larnaude et Lebaupin.
- Villiers** (Gabriel-Aimé-Albert), ingénieur chez MM. de Lachomette, Villiers et C^o, 4, quai de la Pêcherie, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Gaillard et Godinet.

Ces candidats ont été élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le Président annonce en ces termes le décès de M. *Dennery* :

« Notre Société a été douloureusement frappée depuis notre dernière réunion par la mort inattendue de M. Dennery, membre du Comité.

» Inspecteur général et président du Comité technique des Postes, Télégraphes et Téléphones, tout récemment encore directeur de l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes, M. Dennery a joué un rôle considérable dans les progrès dont a bénéficié, depuis trente ans, la technique de la télégraphie et de la téléphonie.

» M. Dennery n'a cessé de manifester dans toutes les occasions

la sympathie qu'il éprouvait pour notre Société, qui conservera de lui un souvenir ému. »

M. le Président fait part du décès de MM. *Bardy, Faure et Lefèvre*.

Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société.

M. le Président prononce les paroles suivantes :

« Notre séance d'aujourd'hui présente un intérêt exceptionnel. Notre dévoué délégué général a pensé qu'il nous serait particulièrement agréable d'entendre quelques-uns des distingués savants et industriels étrangers venus à Paris pour la Conférence internationale des grands Réseaux à très haute Tension, si brillamment organisée par l'Union des Syndicats de l'Electricité, et dont le grand succès vous est déjà connu.

» MM. GILLON, professeur à l'Université de Louvain ; SEMENZA, président désigné de la Commission électrotechnique internationale, et HUNTER, ingénieur en chef de la Calender's Cable C^o, vont nous faire trois conférences sur des sujets de la plus grande actualité pour les électriciens du monde entier.

» Je souhaite, en votre nom, la plus cordiale bienvenue à ces éminents représentants de trois pays amis et alliés, et je les remercie sincèrement d'avoir bien voulu distraire à notre profit quelques heures d'une semaine exceptionnellement chargée. »

M. le professeur Gillon présente une communication sur les laboratoires d'essais à très haute tension.

Il examine les dispositions à prendre pour les laboratoires d'essais à 500 000 volts et au delà : types de transformateurs, dispositions des locaux, appareils accessoires. Il insiste sur les instruments de mesure utilisables et indique quelques données d'expérience relatives à un poste à 500 000 volts.

Sur une question posée par M. le président, le conférencier déclare que le laboratoire de Louvain, dont il a parlé, est encore en montage et sera terminé dans un mois ou deux.

M. le Président, en remerciant M. Gillon, exprime l'espoir que la Société pourra, quelque jour, aller visiter les installations si intéressantes qui viennent d'être décrites.

M. Semenza présente quelques considérations sur le problème des échanges d'énergie entre réseaux électriques.

Après avoir rappelé rapidement les précédents, il pose le problème général des liaisons entre de grands réseaux alimentés hydrauliquement avec ou sans réservoirs et ceux à alimentation thermique.

L'expérience acquise en Italie pendant la guerre a permis d'étudier les avantages et les inconvénients des échanges d'énergie entre réseaux et de leur marche en parallèle.

Les problèmes de la jonction des réseaux par le centre ou par la périphérie, du réglage de la tension et de la répartition des puissances active et réactive, des répercussions et amplifications des accidents et incidents de service sont examinés en détail.

Le conférencier fait ressortir la difficulté qu'il y a à établir une commande unique de plusieurs réseaux interconnectés.

Après avoir montré le rôle que peut jouer l'électrification des chemins de fer dans les échanges d'énergie entre réseaux, il arrive à la conclusion qu'en l'état actuel des choses on ne doit pas pousser au delà de certaines limites la liaison des réseaux, pour ne pas compromettre la régularité et l'économie du service.

M. Boucherot exprime le vœu que les discussions qui n'ont pu être complètement épuisées à la Conférence internationale des grands Réseaux à très haute Tension soient reprises par la Société française des Electriciens.

Il fait des réserves sur la jonction des réseaux par la périphérie, méthode qui lui paraît dangereuse. Il rappelle que M. Picou partage cet avis. Sur les très longues lignes, la transmission à impédance constante qui, sans artifice coûteux, supprime l'onde de retour, est la seule possible.

M. le Président remercie M. Semenza ; on ne pouvait exposer plus clairement une question qui présente des aspects si complexes.

Il remercie aussi M. Boucherot de ses observations et de sa suggestion de faire reprendre par la Société française des Electriciens les discussions commencées à la Conférence internationale des grands Réseaux.

M. Hunter présente une communication sur le contrôle et les manœuvres dans les réseaux à haute tension.

Il met en balance, d'une part, l'importance qu'il y a à assurer sans discontinuité la fourniture de l'énergie ; d'autre part, le coût des appareils de contrôle.

Il cite des exemples concrets et décrit le système à quatre conducteurs qu'il a combiné pour la localisation des défauts.

Il décrit enfin le système Fawsett d'enregistrement à distance de l'énergie active et de l'énergie réactive.

M. le président le remercie des renseignements très intéressants qu'il nous a apportés.

Les communications de MM. Gillon, Semenza et Hunter et les observations de M. Boucherot paraîtront in-extenso dans un Bulletin ultérieur.

La séance est levée à 19 h 15.

NÉCROLOGIE

JULES VIOLLE

MEMBRE DE L'INSTITUT, COMMANDEUR DE LA LÉGION D'HONNEUR

La Société des Electriciens a éprouvé cette année une grande perte en la personne de J. Violle, membre de l'Institut, ancien président de la Société, qui s'est éteint le 12 septembre, dans sa propriété de Fixin, près de Dijon.



JULES VIOLLE

Cliché Pirou

Né à Langres le 16 novembre 1841, fils et petit-fils de mathématiciens, J. Violle fut reçu en 1861 à l'Ecole polytechnique et à l'Ecole normale; il opta pour cette dernière, dont il sortit premier, agrégé des Sciences physiques.

Pasteur, alors sous-directeur de l'Ecole normale, avait été frappé des heureuses aptitudes et de la brillante intelligence du jeune physicien : dès 1867, il rappelait à Paris J. Violle, alors professeur à Dijon, et lui donnait une place d'agrégé-préparateur chez Lacaze-Duthiers, puis, un an après, au Laboratoire de physique de l'Ecole. L'appréciation de Pasteur était juste, et les débuts de J. Violle dans la science se traduisirent par une thèse qui est l'un des plus remarquables travaux effectués en vue de la détermination de l'équivalent mécanique de la calorie.

Successivement professeur à la Faculté de Grenoble, puis à celle de Lyon, J. Violle revint à Paris, en 1884, comme maître de conférences à l'Ecole normale : en 1891, il était nommé professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers.

En 1897, il fut élu à l'Académie des Sciences, où il succédait à Fizeau : la Notice personnelle qu'il écrivit en cette circonstance est non seulement intéressante, mais aussi d'une rare élégance de style.

Deux ans plus tard, il devenait membre de la Royal Institution of Great Britain.

Avec lui disparaît un grand physicien, dont l'esprit était juste, le savoir profond, dont l'Œuvre est de premier ordre. Chose rare, cette Œuvre n'a pas vieilli, les méthodes de J. Violle ne portent pas la marque du temps, l'ampleur des moyens d'action auxquels il faisait appel n'a pas été dépassée, les sujets de ses recherches étaient de ceux dont l'intérêt n'a fait que croître avec les découvertes modernes; son *Traité de Physique* ne contient pas une page dont la valeur soit aujourd'hui diminuée.

Les grandes questions qui s'inscrivent en tête de la physique générale ont constamment retenu l'attention de J. Violle, et, tout particulièrement, le problème capital du rayonnement des corps à haute température. Une longue série de recherches, largement traitées, fut consacrée par lui à l'étude de la radiation solaire, à la mesure des températures élevées, à la création d'étalons de lumière.

La détermination de la constante solaire et de l'absorption atmosphérique l'occupa pendant plusieurs années; après avoir réalisé un actinomètre de grande précision, J. Violle n'hésita pas à porter l'instrument sur les hauts sommets des Alpes, sur le Mont-Blanc même, en 1875, puis, deux ans plus tard, en plein été, au Sahara, où les conditions atmosphériques sont d'une remarqua-

ble fixité. Il obtint ainsi, pour la constante solaire, la première valeur dont la haute approximation fût certaine.

Pour avoir une évaluation approchée de la température du soleil, J. Violle compara son rayonnement à celui de sources terrestres qu'il eut soin de choisir exceptionnelles : ce furent des coulées d'acier aux forges d'Allevard, puis des bains de platine en fusion, et il montra que, contrairement à ce qu'on supposait alors, la température moyenne de la surface solaire ne dépasse pas quelques milliers de degrés.

Le problème de la mesure correcte des hautes températures fut résolu par lui à l'aide d'une méthode nouvelle, basée sur la détermination de la loi de variation des chaleurs spécifiques de corps très réfractaires et comportant l'emploi de moyens dont la puissance, même actuellement, paraît considérable ; ce fut avec des arcs électriques consommant plus de cent chevaux que J. Violle mesura la température du cratère positif, et celle, plus élevée encore, de la flamme jaillissant de ce cratère. La détermination précise des points de fusion de l'or, du palladium, du platine, etc..., vint d'autre part donner aux physiciens de nouveaux repères dont l'exactitude ne laissait rien à désirer.

Ces travaux le conduisirent à la création d'un étalon absolu de lumière : le Congrès international des Electriciens avait, en 1881, posé la question et signalé l'impossibilité de définir les sources lumineuses constituées par des flammes ; J. Violle proposa une solution audacieuse, mais parfaite au point de vue définition, qui était de prendre comme source l'unité de surface de platine fondu, à sa température de solidification. En 1884, la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques comprit l'intérêt que présentait le choix d'une telle source de lumière et adopta le nouvel étalon, auquel le nom de J. Violle restera toujours attaché.

Ce fut à la suite de ces remarquables travaux que Moissan s'adressa à lui pour réaliser le four électrique avec lequel il devait fonder une métallurgie nouvelle.

On doit encore à J. Violle une longue série de mémorables expériences sur la propagation du son, la déformation des fronts d'onde, la dispersion des sons complets en milieu limité.

Nous ne saurions non plus oublier l'élégante explication qu'il donna des geysers d'Islande, dont il montrait à ses auditeurs du

Conservatoire des Arts et Métiers une impressionnante reproduction.

Rappelons encore ses très originales recherches sur la haute atmosphère et l'actinométrie en ballon sonde.

Son activité ne se borna pas aux travaux de laboratoire ; membre depuis 1907 de la Commission d'Examen des Inventions intéressant les Armées de terre et de mer, il accepta, en 1915, de présider la Commission supérieure des Inventions relatives à la Défense nationale, et conserva ces fonctions jusqu'à sa mort.

Nommé en 1913 rapporteur de la Commission créée pour élaborer le projet de loi relatif aux mesures commerciales et industrielles, puis chargé, en qualité de commissaire du Gouvernement, de défendre le projet devant le Sénat, il contribua à faire voter la loi du 2 avril 1919 sur les unités de mesure.

En qualité de président de la Commission d'études de la Monnaie, il prit également part aux travaux qui aboutirent à la fabrication des monnaies de nickel et d'aluminium.

Dans le monde savant, où il ne comptait que des amis, dans les nombreuses sociétés scientifiques dont il présida les réunions, le souvenir de J. Violle demeurera, et les auteurs qui écriront sur la Physique générale citeront toujours son nom qui fut celui d'un vrai savant.

A un autre titre, d'un caractère plus grave, le nom de J. Violle ne doit pas être oublié de nous : le plus jeune de ses quatre fils mobilisés est mort au Champ d'honneur.

Au nom de la Société française des Electriciens, nous adressons à la famille de notre regretté président l'expression de la profonde sympathie avec laquelle nous prenons part à sa douleur.

P. VILLARD, *de l'Institut.*

RECHERCHES SUR LA RÉSISTIVITÉ DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES

M. LÉON GUILLET. — « *Avant-propos.* — La question de la résistivité des produits métallurgiques a une importance primordiale du point de vue scientifique comme du point de vue industriel.

» D'une part, elle permet, en maintes circonstances, de préciser les diagrammes des alliages et spécialement les zones formées de solution solide unique, et de connaître l'état sous lequel se trouvent les impuretés. D'autre part, elle mérite de fixer toute l'attention d'un grand nombre d'industriels, non seulement parce qu'elle fournit des valeurs d'un haut intérêt dans des cas importants, mais aussi parce qu'elle conduit à préciser les conditions de fabrication des produits utilisés comme conducteurs ou comme résistances.

» Cette étude sera divisée en quatre parties :

» La première rappellera des faits connus.

» La deuxième résumera des travaux que nous avons poursuivis avec M. Balay sur l'influence de l'écrouissage sur la résistivité.

» La troisième donnera les résultats que nous venons de trouver pour la résistivité de l'aluminium en fonction de ses impuretés et des traitements qu'il subit.

» La quatrième étudiera le problème de l'obtention des moules de cuivre pur et indiquera comment la mesure de la résistivité a été pour nous un guide particulièrement précieux.

I. GÉNÉRALITÉS. RÉSULTATS CONNUS.

» M. Henry Le Chatelier a étudié la variation de la résistivité des alliages binaires en fonction de leur constitution, celle-ci étant exprimée en volumes.

» Ces lois ont été précisées par Guertler et par Kournakow et Zemczuzny. Les voici :

» 1° L'alliage est formé des deux métaux juxtaposés :

» La conductibilité est une fonction linéaire de la concentration;

» 2° Les métaux sont isomorphes (formation d'une solution solide) :

» La conductibilité varie suivant une courbe continue, présentant généralement un minimum très accusé ;

» 3° Les métaux forment une combinaison :

» Cette combinaison possède une conductibilité qui lui est propre.

» Bien entendu, il faut généraliser les cas précédents et noter spécialement les points suivants :

» 1° La miscibilité partielle est mise en vue par une courbe, dont les limites précisent le début et la fin de la solution solide.

» 2° La forme du diagramme de conductibilité dans le voisinage d'une combinaison permet de savoir si celle-ci garde sa personnalité (ligne droite) ou si elle entre en solution (courbe).

» On retiendra tout particulièrement que la détermination de la résistivité permet de préciser et de contrôler les diagrammes thermiques. De plus, on remarquera que, dans aucun autre cas que celui de la combinaison, on ne peut avoir une conductibilité supérieure à celle du métal pur le plus conducteur. Comme toute combinaison (ou solution de combinaison) est dure et fragile, on doit industriellement s'adresser aux métaux purs pour obtenir une haute conductibilité. On devra même rechercher des métaux aussi purs que possible, en évitant spécialement les impuretés entrant en solution.

» Enfin, dans les additions finales, faites en vue de l'épuration, d'un bain métallique, additions qui nécessitent généralement un excès d'agent d'affinage, il faut — si l'on ne veut pas diminuer la conductibilité du métal — éviter tout corps dont l'excès entrerait en solution dans le métal.

II. INFLUENCE DE L'ÉCROUISSAGE SUR LA RÉSISTIVITÉ DES MÉTAUX ET DES ALLIAGES.

» Ces recherches ont été faites, avec M. Marcel Ballay, aux laboratoires des usines de Dion et Bouton (¹).

(¹) Cette partie de la conférence a déjà paru, très développée, dans la *Revue de Métallurgie*. Nous ne pensons pas devoir la reproduire ici.

III. CONDUCTIBILITÉ DE L'ALUMINIUM COMMERCIAL. INFLUENCE DES IMPURETÉS ET DES TRAITEMENTS.

1° *Avant-propos.*

» Il est couramment admis que l'aluminium présente une résistivité de :

$$\rho = 2.79 \text{ microhms-cm}^2\text{:cm (1) à } 20^\circ \text{ C.}$$

» Cette donnée ne précise ni l'influence des impuretés, ni celle des traitements.

» Nous avons donc jugé intéressant de reprendre la question dans les conditions suivantes :

» 1° Comparer les qualités courantes d'aluminium sous les différents états où il se présente : coulé, laminé, filé à la presse et tréfilé.

» Malheureusement, par suite d'une confusion, les métaux utilisés pour la coulée et ceux employés dans les différents traitements thermiques n'ont pas été les mêmes.

» Voici leurs analyses :

» 1° *Métaux coulés :*

	I	II	III	IV
Silicium	0,32	0,16	0,47	0,23
Fer	1,30	0,83	0,49	0,18

2° *Métaux ayant subi des traitements thermiques :*

	I	II	III	IV
Silicium	0,89	0,68	0,51	0,25
Fer	0,91	0,53	0,42	0,24

» 2° Pour bien définir l'influence des traitements mécaniques, nous avons fait subir au métal — pour chaque échantillon — une déformation plus ou moins prononcée et chaque essai a été fait sur métal brut de traitement et sur métal recuit.

» Les réductions de section dans les traitements ont été les suivantes :

» 1° Le point de départ a toujours été un lingot de secteur carré de 100 mm de côté.

» 2° Dans le filage à la presse, on a préparé des barres rondes ayant pour diamètres : 50, 30, 15 et 8 mm.

» 3° Dans le laminage, on a préparé des barres carrées de 42, 19, 10 et 7 mm de côté et une barre ronde de 7 mm de diamètre.

(1) *Circular of the Bureau of Standards* n° 76, avril 1919 :

Résistivité de l'aluminium courant : 2,828 microhms-cm²:cm
à 99,66 2,789

(Ces dimensions nous ont été imposées par celles du laminoir dont nous disposions.)

» 4° Dans l'étirage, on est parti du rond de 7 mm obtenu par laminage et on a tréfilé à environ : 5,7, 5,1, 4,5, 4, 3,5, 3,25, 2,5 et parfois 2 mm.

» Les conditions des traitements ont été les suivantes :

» Le filage à la presse a été fait entre 400 et 425° C :

» Le laminage à 425° C ;

» L'étirage à froid, sans recuit intermédiaire.

» Dans les mesures, nous avons suivi les méthodes suivantes :

» 1° Pour la résistivité, les fils ont été plongés dans un bain d'essence maintenu à la température de 20° C ; la détermination a été faite au pont de Thomson, avec un écartement des couteaux de 150 mm.

» 2° Pour la dureté, l'essai a été fait sous une charge de 100 kg avec une bille d'un diamètre de 5 mm.

» Recuit des éprouvettes au bain de sel à 450° C pendant 30 minutes et refroidissement à l'air.

2° Essais sur métaux coulés

» Ces essais sont résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU I

	Marque des éprouvettes	Composition des éprouvettes			Diamètre mm	Section cm ²
		Al	Si	Fe		
Al 1	KK	98,38	0,32	1,30	8,01	0,50391
» 2	LL	99,01	0,16	0,83	8,04	0,50785
» 3	NN	99,05	0,47	0,49	8,011	0,50379
» 4	MM	99,59	0,23	0,18	8,036	0,50719
		Métal brut		Métal recuit (450° 30')		Rapport des résistances pour le métal brut et le métal recuit
		Résistance microhms	Résistivité ρ microhms- cm. ² /cm	Résistance microhms	ρ microhms- cm. ² /cm	
Al 1		99,3	3,33	96,2	3,23	1,031
» 2		90,5	3,06	89,3	3,02	1,013
» 3		93,7	3,14	91,6	3,08	1,023
» 4		86,9	2,94	86,7	2,93	1,002

» On voit que la résistivité la plus faible ($\rho = 2,94$) est donnée par l'échantillon le plus pur (Si = 0,23 et Fe = 0,18) et la résisti-

tivité la plus élevée, par l'échantillon dans lequel la quantité silicium + fer est la plus forte (Si = 0,32; Fe = 1,30).

» De plus, la comparaison des échantillons 2 et 4 est spécialement intéressante. En effet, l'échantillon 2 contient très peu de silicium (0,16) et une quantité importante de fer (0,83) ; l'échantillon 4 renferme relativement peu de silicium (0,23) et très peu de fer. Leur résistivité est peu différente : 3,06 et 2,94. Le fer agit donc peu sur la résistivité ; ceci pouvait être affirmé à priori, le fer ne formant pas de solution solide, mais donnant la combinaison Al^3Fe .

» Cependant, la plus haute résistivité n'est pas donnée par l'échantillon le plus riche en silicium. L'aluminium n° 3 renfermant Si = 0,47 et Fe = 0,49 est moins conducteur ($\rho = 3,14$) que l'aluminium n° 2 ($\rho = 3,06$) qui contient Si = 0,16 et Fe = 0,83.

» Le silicium a donc une action prépondérante ; il forme, on le sait, une solution solide, limitée, d'ailleurs, par une faible teneur en silicium.

3° Essais sur métaux laminés.

» Les essais sur métaux laminés sont donnés dans le tableau II.

» Ce tableau appelle un certain nombre de remarques :

» 1° Si l'on compare les résistivités des métaux recuits, on trouve la moyenne suivante :

Eprouvettes n°	Si	Fe	ρ microhms-cm ² /cm	Δ
1	0,89	0,91	2,99	28,5
2	0,88	0,51	2,91 ⁽¹⁾	27
3	0,51	0,42	2,90	26,5
4	0,21	0,24	2,82	24

(¹) Avec variations assez notables : 2,89 à 2,95.

» La dureté diminue avec les impuretés ; la résistivité aussi ; mais, ici, les teneurs en silicium et en fer varient dans le même sens, et l'on ne peut guère conclure. Toutefois, on note une diminution très importante dans la teneur en fer entre l'échantillon 1 et l'échantillon 2, tandis que la quantité de silicium est à peu près constante : la variation de la résistivité est sensible (2,99 à 2,91), plus grande qu'entre les échantillons 2 et 3 pour lesquels le silicium est nettement diminué.

» En tous les cas, les teneurs en silicium et en fer ont une réelle

TABLEAU II

Forme de l'éprouvette	Diam. mm	Section cm²	Métal brut		Rapport des résist. du métal brut au métal recuit	Métal brut		Métal recuit		Métal brut		Métal recuit à l'air pendant 30 mn	
			Résistance microhms	Résistivité cm².cm		d	Δ	d	Δ	R kg. mm²	E kg. cm. tièmes	R kg. mm²	E kg. cm. tièmes
Al 1 carré	8,04	0,50769	92,0	3,11	88,8	3,00	1,036	1,95-1,92	33	2,10-2,06	28		
„ „	7,97	0,49889	97,1	3,23	90,6	3,01	1,071	1,94-1,90	31	2,04-2,04	29	11,6	3,9
„ „	8,045	0,50833	94,6	3,21	87,6	2,97	1,080			2,00-2,07	29	10,2	2,5
„ rond	7		116		107		1,084	1,73-1,81	39	2,03-2,10	28		
Al 2 carré	7,985	0,50077	91,9	3,07	88,4	2,95	1,039	1,98-1,91	32	2,08-2,11	28		
„ „	8,065	0,51086	91,0	3,09	85,1	2,89	1,069	1,86-1,81	36	2,05-2,12	23	12,1	8,2
„ „	8,015	0,50448	92,8	3,12	86,4	2,90	1,074	1,60-1,66	47	2,12-2,17	26	9,7	2,5
„ rond	7		118		112		1,053	1,81-1,77	38	2,15-2,15	26		
Al 3 carré	8,025	0,50580	89,4	3,01	86,4	2,91	1,034	1,84-1,75	38	2,13-2,13	26		
„ „	8,045	0,50833	87,9	2,98	85,6	2,90	1,026	2,08-2,04	29	2,10-2,11	27	9,4	3,6
„ „	8,00	0,50265	87,6	2,94	86,4	2,89	1,013	1,80-1,74	39	2,11-2,12	27	9,5	2,5
„ rond	7		89,95		89,4		1,006	1,84-1,77	38	2,15-2,16	26		
Al 4 carré	8,13	0,51910	82,65	2,86	81,5	2,82	1,014	1,97-1,94	32	2,24-2,22	24		
„ „	7,995	0,50203	85,3	2,86	84,8	2,83	1,005			2,26-2,27	24	8,3	3,2
„ „	8,015	0,50448	85,3	2,87	83,6	2,81	1,020	1,91-1,90	34	2,29-2,30	23	8,3	2,1
„ rond	7		108,5		107,3		1,011						

importance, puisque l'échantillon 4 présente une résistivité de 2,82 et l'échantillon 1 une résistivité de 2,99 microhms-cm²:cm.

» 2° Pour un même échantillon, la réduction de section a une influence irrégulière qui dépend sans doute de la température de fin de laminage.

» D'ailleurs, la dureté du métal brut est aussi irrégulière, mais il n'apparaît pas de concordance avec la dureté et la résistivité.

Sur quelques échantillons laminés, il a été fait un essai de traction ; nous avons obtenu :

Numéros des échantillons	Echantillons bruts de laminage				Echantillons recuits			
	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Σ centièmes	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Σ centièmes
1	11,6	3,9	30,8	60,3	10,2	2,5	33,8	78
2	12,1	8,2	22	72,8	9,7	2,5	30,1	80
3	9,4	3,6	34,5	79,1	9,5	2,5	33	78
4	8,3	3,2	40,4	85,3	8,3	2,1	41,1	89,8

» Ces résultats confirment, en le précisant, ce que l'on sait déjà de l'influence des impuretés. On notera ces valeurs particulièrement intéressantes.

» En résumé, on doit admettre que le laminage augmente la résistivité dans des proportions relativement faibles, mais cependant d'autant plus nettes que les impuretés sont plus importantes.

4° Essais sur métaux filés.

» Les aluminiums filés à la presse ont donné à la série d'essais les résultats indiqués dans le tableau III :

» Nous insisterons sur les points suivants :

» 1° A l'état recuit, on a les moyennes suivantes :

	Si	Fe	ρ microhms-cm ² :cm	Δ
N° 1			2,99	28
N° 2			2,93	27
N° 3			2,92	26
N° 4			2,86	23

» Ces résultats sont bien comparables à ceux du tableau des métaux laminés et recuits. Il semble cependant qu'il y ait une tendance après filage à une résistivité un peu plus élevée qu'après le laminage.

» 2° A l'état brut de filage, la résistivité et la dureté sont nette-

ment plus élevées qu'à l'état recuit et, là encore, nous trouvons que la réduction de section a d'autant plus d'importance que la section est plus forte, dans les métaux les plus impurs ; pour les aluminiums les plus purs, l'influence de la réduction est faible.

» Pour les métaux les plus chargés en silicium et fer, on atteint une résistivité de 3,35 microhms-cm²:cm, alors que le même métal recuit a une résistivité de 3,00.

» Les essais de traction ont donné :

Numéros des échantillons	Diamètres	Echantillons bruts de filage				Echantillons recuits			
		R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Σ centièmes	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Σ centièmes
1	15	10,8	4,3	27,9	79,1	8,6	2,1	30,8	84,5
2	15	9,6	4,6	30,1	81,8	8,5	1,4	29,4	83,6
3		8,15	2,8	32,3	80,9	8,3	1,8	32,3	81,8
4	15	7,4	3,2	32,3	91,7	7,2	1,8	30,8	94,7

» L'influence du recuit est d'autant plus accusée que les impuretés sont plus importantes. Les allongements cependant variaient peu et les strictions de métaux filés, recuits ou non, sont remarquables.

5° Essais sur métaux tréfilés.

» Une dernière série d'essais a été faite dans les conditions précédemment indiquées sur métal tréfilé.

» On en trouvera les résultats dans le tableau IV.

» On notera les points importants qui suivent :

» 1° A l'état recuit, la moyenne des essais donne pour la résistivité ρ :

Echantillon 1	2,96 microhms-cm ² :cm.
— 2	2,92 —
— 3	2,90 —
— 4	2,85 —

» 2° Plus l'écroutissage est prononcé, plus grande est la résistivité pour les métaux impurs (2,94 à 3,25 microhms-cm²:cm).

» 3° Pour les métaux à faible teneur en impuretés, l'écroutissage a peu d'influence (2,83 à 2,88; 2,89 à 3,01 microhms-cm²:cm) et cette influence se fait sentir dès une faible passe de tréfilage.

» Voici d'ailleurs les résultats des essais de traction. Ils mon-

TABLEAU IV

	Diamètre mm	Section cm²	Métal brut		Métal recuit		Rapport des résistances du métal brut et du métal recuit	Métal brut			Métal recuit à 550° pendant 30 mn		
			Résistance microhms	Résistivité cm·h·cm	Résistance microhms	Résistivité cm·h·cm		R	E	A	R	E	A
Al 1	2,55	0,031051	954	3,25	873,5	2,97	1,092						
"	3,25	0,082958	585,5	3,24	538	2,97	4,088						
"	3,33	0,097868	492,5	3,21	454,5	2,96	1,083						
"	4,03	0,12756	376	3,20	347	2,95	1,083						
"	4,335	0,16153	297	3,20	274	2,95	4,084						
"	5,11	0,20308	231	3,16	215,3	2,94	1,073						
"	5,72	0,25697	183	3,14	163	2,80	1,122	15,8	13,7	10,9	9,7	?	32,9-
"	5,74	0,25877	483	3,16	171	2,94	1,070	15,2	13,7	43,4	8,6	?	39,2
Al 2	2,525	0,050075	926	3,09	886	2,95	1,045						
"	3,02	0,071631	645,5	3,08	611,7	2,92	1,055						
"	3,24	0,082448	548	3,01	529	2,91	1,036						
"	3,25	0,082958	548	3,03	531,2	2,94	4,031						
"	4,04	0,12819	359	3,07	341,5	2,91	1,051						
"	4,54	0,16188	281	3,03	267	2,88	1,052						
"	5,16	0,20912	220	3,07	208	2,89	1,057	15,6	13,4	11,1	8,3	?	33,3
"	5,77	0,26148	175,5	3,06	167,3	2,91	1,049	15,1	13,4	11,1	10,2	?	40,2
Al 3	2,00	0,031416	1430	2,99	1377	2,88	1,038						
"	2,51	0,049481	913	3,01	885	2,91	1,031						
"	3,02	0,071631	623,5	2,98	609	2,90	1,023						
"	3,50	0,096211	467	2,99	453,5	2,90	1,029						
"	4,03	0,12756	352	2,99	343,2	2,91	4,025						
"	4,50	0,15904	281	2,98	275	2,91	1,022						
"	5,10	0,20428	219	2,98	214	2,91	1,023	15,1	13,4	?	8,3	?	26,3
"	5,10	0,20428	219	2,98	212,3	2,89	1,031	15,1	13,4	13,8	8,3	?	30,5
Al 4	2,015	0,031889	1310	2,85	1320	2,80	1,015						
"	2,515	0,049678	873,5	2,89	865	2,86	1,009						
"	3,24	0,082148	524	2,88	519	2,85	1,009						
"	3,53	0,097868	440	2,87	435	2,83	1,011						
"	4,00	0,12566	338,5	2,84	337,2	2,82	4,009						
"	4,485	0,15558	274	2,86	272,3	2,94	1,006						
"	5,06	0,20109	211	2,83	212,1	2,84	0,994						
"	5,72	0,25697	163,5	2,83	165	2,83	1,003	13,3	10,7	13,4	7,4	?	36,5
"								12,9	12,7	13,4	7,8	?	39,2

trent bien qu'il n'y a aucune relation entre l'érouissage et la résistivité.

	Diamètre mm	Métal brut de tréfilage				Métal recuit			
		ρ microhms- cm ² :cm	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	ρ microhms- cm ² :cm	R kg:mm	E kg:mm ²	A centièmes
1	5,72	3,14	15,6	13,7	12,2	2,90	9,2		36,1
2	5,60	3,07	15,3	13,4	11,1	2,89	9,3		36,8
3	5,10	2,98	15,1	13,4	13,8	2,91	8,3		28,4
4	5,72	2,83	13,1	11,7	13,4	2,83	7,6		37,9

Conclusions.

- » En résumé, cette étude établit les points suivants :
- » 1° Les impuretés ont une notable influence sur la résistivité. Il semble que le silicium en ait plus que le fer.
- » 2° Les traitements thermiques n'ont pas d'influence marquée sur la résistivité du métal recuit.
- » 3° L'érouissage produit une augmentation de la résistivité.
- » 4° Cette augmentation est insignifiante dans l'aluminium à peu près pur; elle est un peu plus importante quand les impuretés croissent.

IV. LA DÉSOXYDATION DU CUIVRE ROUGE ET LE MOULAGE D'OBJETS EN CUIVRE

Avant-propos.

» On sait que la présence d'oxydure de cuivre — soluble dans le cuivre liquide, insoluble dans le cuivre solide — abaisse nettement les propriétés mécaniques du cuivre rouge, spécialement la résilience.

» D'un autre côté, tous les praticiens de la fonderie affirment qu'il est extrêmement difficile — pour ne pas dire impossible — d'obtenir un moulage utilisable en cuivre rouge; le produit direct de la coulée est toujours extrêmement poreux, possède de nombreuses et importantes cavités et le métal n'a aucun intérêt industriel.

» Le problème de la coulée du cuivre intéresse, d'une part, les affineurs de ce métal, et, d'autre part, les fondeurs et de grandes industries mécaniques, spécialement les industries électriques.

» Aussi a-t-il donné lieu à de nombreuses études, quoique l'on doive constater, non sans un certain étonnement, que la pratique de l'addition finale n'est nullement courante, même en affinage.

» En voici, pensons-nous, la raison : une grande partie du cui-

vre rouge est utilisée dans l'industrie électrique; sa conductibilité électrique doit donc demeurer la plus élevée possible. Or, il n'est peut-être pas inutile de rappeler, même ici, que trois cas peuvent se produire :

» 1° — L'addition — soluble dans le cuivre solide — abaissera sa conductibilité et cela d'autant plus que le poids moléculaire de cette addition sera plus élevé; ce sera le cas du silicium, du phosphore, de l'aluminium, du zinc, du magnésium.

» Le silicium, le phosphore donneront, par suite de leur faible poids moléculaire, un abaissement relativement faible.

» 2° — L'addition — insoluble dans le cuivre solide — peut s'en séparer à l'état liquide. Cette séparation peut se produire soit par volatilisation, cas du cadmium, de plus en plus utilisé, soit par liquation, cas du plomb, qui a été essayée de différents côtés.

» Si la séparation est complète, évidemment l'influence de l'addition sur la résistivité est nulle.

» 3° — L'addition — soluble dans le cuivre liquide et insoluble dans le cuivre solide — s'isole sous forme du métal même, d'une combinaison ou d'une solution de combinaison.

» On sait qu'alors la présence de la combinaison ou de sa solution diminue les propriétés mécaniques et les facilités de traitement mécanique.

» Quant au métal même, sa présence peut ne pas diminuer la conductibilité du cuivre, mais à une condition essentielle, à savoir que sa propre conductibilité soit au moins égale à celle du cuivre. Seul l'argent serait dans ces conditions; mais il forme avec le cuivre une solution solide et rentre par conséquent dans le premier cas.

» On voit donc que le problème est complexe. Le cadmium ne donne pas une solution définitive.

» On peut établir un ensemble de courbes donnant l'influence des impuretés sur la conductibilité du cuivre. Mais il a été publié plusieurs études — généralement peu détaillées — sur l'emploi, aux Etats-Unis, d'un carbure de bore préparé au four électrique et qui donnerait des résultats très constants, permettant d'obtenir des moulages extrêmement sains et un métal de très haute conductibilité.

» Notre collègue et ami, M. Lazare Lévi, directeur général de la Compagnie française pour l'Exploitation des procédés Thomson-Houston, se rendant aux Etats-Unis, voulut bien nous en rap-

porter. Ultérieurement, la société « L'Aluminium français » nous en remit d'autres quantités qui nous ont permis d'achever nos essais.

» Enfin, la Compagnie Thomson-Houston mit à notre disposition un produit spécialement préparé par réduction partielle de l'anhydride borique par l'aluminium et appelé commercialement — et non scientifiquement — du nom d'oxyde de bore.

» L'enchaînement des essais que nous fîmes avec ces produits est, en lui-même, extrêmement curieux et nous pensons qu'il intéressera autant que les résultats eux-mêmes.

I. Les produits utilisés.

» Les deux échantillons du produit vendu aux Etats-Unis sous le nom de *carbure de bore* ont donné à l'analyse :

	Echantillon n° 1	Echantillon n° 2
Bore	45,15	59,08
Carbone	35,31	29,20
Silicium	8,68	2,50
Fer + aluminium	7,15	6,98
	<u>96,29</u>	<u>97,76</u>

» Le bore a été dosé par la méthode suivante : attaque du carbure au bioxyde de sodium, reprise par l'acide sulfurique et distillation de l'acide borique formé à l'état d'éther méthylique ; dosage volumétrique de l'acide ainsi isolé.

» Ce carbure de bore se présente sous l'aspect d'une poudre noirâtre, légère.

» Comme on le verra dans la suite, nous avons été conduits à élargir le cercle de nos recherches et nous avons étudié des additions autres que celles déjà indiquées.

II. Méthode expérimentale.

» La méthode utilisée dans ces essais a été la suivante : L'addition voulue, variable d'ailleurs d'un essai à l'autre, était faite avant la coulée. Le métal était versé dans une coquille et dans un moule en sable.

» La coquille avait les dimensions suivantes :

et	diamètre intérieur		40 mm	} pour les essais 1 à 6.
	— extérieur		50 mm	
	longueur		520 mm	
	diamètre intérieur		47 mm	} pour les essais 7 à 12.
	— extérieur		90 mm	
	longueur		510 mm	

» Les jets étaient coulés en coquille sans masselotte. Le moule en sable fournissait des jets cylindriques de 40 mm de diamètre et 400 mm de longueur.

» Les masselottes avaient un volume de 200 cm³.

» Pour chaque sorte de métal, en coquille et en sable, il a été fait un essai de traction, un essai de choc et parfois une analyse chimique et un essai de résistivité. Pour ce dernier essai, le métal était forgé à température élevée (section finale de 20 mm de diamètre) et recuit.

» Ajoutons de suite que tous les essais réalisés ont démontré que, dans les échantillons traités au bore, il n'était pas possible de déceler cet élément après l'essai.

Première série d'essais.

» Cette série a été faite dans les conditions suivantes : Le métal était porté à l'état liquide dans un creuset ordinaire de graphite. Celui-ci était enlevé du four potager où avait lieu le chauffage.

» L'addition de carbure de bore était faite dans les proportions voulues, la poudre étant placée à la surface du bain et agitée avec une *cuiller en fer*. On laissait reposer, la poudre remontait en surface, on l'écraimait et le métal était coulé en coquille, puis en sable. Les jets étaient démoulés à basse température, puis séparés des masselottes.

» Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

Numéro de l'essai	Coulée	Quantité de bore en centièmes	Essai de choc		Essai de traction				Essai de dureté (Δ)	
			ρ	α	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Σ centièmes	Haut	Bas
1	Coquille	0	1,5- 1,7	172-167	(Soufflures rendant l'usinage impossible)				40	48
2	Sable	0	0,7- 1,0	167-167	3,9	?	0	?	44	49
3	Coquille	0,5	16,1-19,5	pliée	19,3	5	34	62,2	40	44
4	Sable	0,5	21,2-20,9	—	18,8	6,6	21,5	?	47	50
5	Coquille	1	19,9-16,4	—	14,6	4	11	mal cassée	38	43
6	Sable	1	18,8-13,9	—	19,8	4,2	39	?	48	44
7	Coquille	1,5	12,4-10,6	—	20,2	4,6	30,5	49,7	45	44
8	Sable	1,5	7,7- 6,0	—	14,6	3,0	12,7	24,6	39	45
9	Coquille	2,0	11,6-10,8	—	17	4,8	42	57,5	39	46
10	Sable	2,0	9,9-10	—	16,20	3,8	20	mal cassée	44	44
11	Coquille	3,0	15,2-17,3	—	17,3	3,7	30	?	49	45
12	Sable	3,0	11,6-18,5	—	15,3	4	17,5	?	42	59

» De cette première série d'essais, on paraissait en droit de conclure que des quantités infimes de bore (0,5 pour 100) donnent des résultats intéressants. En effet, on note malgré quelques irrégularités présentées notamment dans l'essai de traction (n° 5, n° 8, n° 10), l'essai de choc qui met en vue une résilience élevée, les éprouvettes se pliant et ne se brisant plus. D'ailleurs, toutes les éprouvettes étaient saines, hormis les deux premières.

» Nous les avons d'ailleurs examiné au microscope et avons constaté que, dès l'addition de 0,5 pour 100 de carbure de bore, le cuivre ne contient plus d'oxydure, tandis que les deux premiers échantillons en renfermaient des quantités importantes.

» Tous ces faits nous conduisaient donc à conclure à l'effet très net du carbure de bore, lorsqu'un incident nous a conduits à pousser beaucoup plus loin la question.

» Nous avons voulu nous assurer de l'influence de l'addition de carbure de bore sur la conductibilité du métal.

» A cet effet, les jets des expériences 6 et 12 furent forgés comme il a été dit. La mesure de la résistivité faite à 20° C donna, après recuit :

$$\rho = 3,53 \text{ et } 3,57 \text{ microhms-cm}^2\text{:cm.}$$

et

$$\rho = 3,68 \quad \text{id.}$$

tandis que la résistivité normale est, chacun le sait, égale à 1,56 microhms-cm²:cm à la même température.

» D'ailleurs, un morceau de cuivre de la première expérience put être forgé et sa résistivité fut trouvée égale à 1,78. Il y avait donc un facteur qui intervenait. L'analyse chimique n'accusa pas la présence du bore, mais indiqua une teneur en fer de 0,25 pour l'échantillon 6 et 0,58 pour l'échantillon 12.

» Le fer pouvait provenir, soit du cuivre initial, soit du carbure de bore qui en renferme, soit enfin du mode opératoire, tout particulièrement de la cuiller en fer utilisée pour brasser énergiquement la poudre de carbure.

Deuxième série d'essais.

» Afin de diminuer la teneur en fer des échantillons préparés et après avoir analysé le cuivre initial qui a donné

$$\text{Cu} = 99,95 \text{ pour } 100,$$

nous avons répété les expériences précédentes, avec cette seule

différence que le mélange du carbure fut effectué, soit avec une cuiller en cuivre, soit avec une spatule de silice.

» A notre grande stupéfaction, les résultats de ces essais ont été *tous nuls* et *tous* les jets obtenus furent semblables à ceux des deux premiers essais de la première série.

Troisième série d'essais.

» Nous avons alors pensé que nous ne reproduisions pas les conditions des premiers essais, notamment au point de vue des températures. Les essais suivants furent alors exécutés en partant de cuivre électrolytique, l'agitation étant toujours produite avec une cuiller en cuivre.

N° des expériences	Addition de bore sous forme de carbure	Température du métal		Coulée
		A la sortie du four	A la coulée	
1	1 pour 100 avant la coulée	1 320°	1 200°	Sable
2	—	1 400°	1 150°	—
3	—	1 240°	1 000°	—
4	1 pour 100 dans le four	Non mesurée	1 130°	Sable
5	—	—	1 220°	—
6	—	—	1 240°	—
7	—	—	1 200°	—
8	—	—	1 100°	—
9	—	—	1 273°	—
10	—	—	1 230°	Coquille
11	—	—	1 203°	—

» Tous les lingots ainsi préparés étaient extrêmement poreux, présentant le même aspect que les deux premiers lingots de la première série.

Quatrième série d'essais.

» Il nous apparaissait ainsi que la température et la méthode de coulée n'intervenaient pas. Il fallait donc attribuer à la cuiller de fer un rôle actif.

» Nous avons procédé alors à l'expérience suivante : nous avons préparé un cuprofer à 50 pour 100 de fer, et nous avons ajouté à du cuivre électrolytique, fondu simultanément, 1,5 pour 100 de bore sous forme de carbure et 0,30 pour 100 de fer sous forme de cuprofer. Nous avons obtenu alors un jet d'excellente qualité donnant :

» Essai de choc : résilience = 14,7 kgm:cm²; éprouvette pliée ;

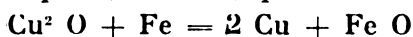
» Essai de traction : $R = 17,1$; $E = 4,1$ kgm:mm²; $A = 50$ pour 100 ; $\Sigma = 75,7$;

- » Essai de dureté : $\Delta = 49$;
- » Résistivité sur métal forgé et recuit : 2,28 microhms-cm.
- » Le fer fut dosé et trouvé égal à 0,12 pour 100.
- » De cet essai, ainsi que des précédentes expériences, on doit conclure que le carbure de bore n'a d'action qu'en présence de fer.

Cinquième série d'essais

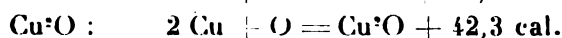
» Cependant, une dernière hypothèse était possible : le carbure de bore agit-il réellement et n'est-ce pas le fer — fer de la cuiller ou fer du cuprofer — qui a l'action intéressante?

» On n'ignore point, en effet, qu'en métallurgie du cuivre, les réactions :



sont considérées comme assez importantes.

» D'ailleurs, les chaleurs de formation des oxydes sont les suivantes :



» Nous avons alors procédé à une cinquième série d'essais, dans les conditions suivantes :

» Les expériences n'ont eu lieu que sur 1 000 grammes de cuivre électrolytique; le cuivre a été porté à 1 300° C, dans un four Méker; le creuset sorti du four, l'addition était faite; l'agitation avait lieu avec une canne de silice et on coulait dans un creuset de terre, au moment où le métal atteignait 1 150° C.

» Le culot obtenu était coupé pour permettre de juger de son état; on prélevait ensuite une éprouvette de choc.

Expé- riences	Addition faite		Etat du métal	Rési- lience kg/cm ²	Teneur en Fe du lingot
1	Aucune		mauvais	1,15 (rompue)	Traces
2	1,5 pour 100	carbure de Bo	—	2,28	—
3	0,3 —	Fe (en fils)	bon	14,4 (pliée)	0,06
4	0,3 —	—	—	14,4	—
5	0,6 —	Fe (en fils)	—	16,1	—
6	Aucune		mauvais	1,3 (rompue)	Traces
7	—		—	1,5	—
8	1,5 pour 100	carbure de Bo	bon	16,1 (pliée)	0,21
+	0,3 —	Fe (en fils)	—	—	—
9	1,5 —	carbure de Bo	—	10,5	0,25
+	0,3 —	Fe (en cuprofer)	—	—	—

» Ces essais prouvent bien que la présence du fer est *nécessaire et suffisante* pour obtenir du cuivre coulé sain et de bonne qualité.

Sixième série d'essais.

» Il nous fallait encore préciser la quantité minimum de fer qu'il était nécessaire d'ajouter soit sous forme de fer métal, soit sous forme de cuprofer pour obtenir le résultat cherché et chiffrer enfin l'influence de la quantité de fer restant dans le cuivre sur les propriétés de ce dernier.

» Nous avons procédé à des essais dans des conditions identiques à celles de la série précédente; mais la seule addition a été celle du fer sous l'une ou l'autre forme (fer en fils, cuprofer) et cela en proportion variable.

Expériences	Addition de fer		Etat du métal	Résilience kgm.cm ²
1	0,10	pour 100 en fils	mauvais	1,8 (rompue)
2	0,15	— —	—	1,3 —
3	0,20	— —	bon	14,7 (pliée)
4	0,20	— —	—	14,2 —
5	0,20	— en cuprofer	mauvais	1,5 (rompue)
6	0,20	— —	—	1,9 —
7	0,30	— —	bon	14,7 (pliée)
8	0,30	— —	—	15,7 —
9	0,40	— —	—	15,7 —

» Donc, dans les conditions de ces essais, l'addition de fer doit être de 0,20 pour 100 si elle est faite sous forme de fil et de 0,30 pour 100 si elle est faite sous forme de cuprofer.

Septième série d'essais.

» Cette dernière série d'essais a été faite à la fonderie même, afin de passer du laboratoire à la pratique.

» Il est évident, à priori, que l'importance de l'addition finale est fonction des opérations de fusion et de coulée, de la masse du métal, etc.

» Le métal était amené à la température de 1 300° C, dans un four potager, le creuset était extrait du four; l'addition était faite, la coulée avait lieu à 150° C.

» La première expérience a été exécutée avec une addition de 0,3 pour 100 de fer sous forme de fils.

» L'agitation étant toujours produite par une canne de silice, la coulée a été faite en coquille (jet rond de 50 mm de diamè-

tre). Le produit obtenu contient de nombreuses soufflures sur toute sa longueur. Il a d'ailleurs donné les résultats suivants :

» Résilience : $\rho = 1,8 \text{ kgm:cm}^2$ (éprouvette rompue) ;

» Dureté : $\Delta = 46 \text{ kg:mm}^2$;

» Traction : $r = 20 \text{ kg:mm}^2$;

$e = 2 \text{ kg:mm}^2$;

$a = 12,2$ pour 100.

» Une seconde expérience a eu lieu dans les mêmes conditions, mais l'addition de fer — toujours sous forme de fils — a été de 0,5 pour 100 Fe. Le jet est absolument sain et l'on a obtenu :

» Résilience : $\rho = 14,4$ et $16,4 \text{ kgm:cm}^2$ (éprouvette pliée) ;

» Traction : $r = 18,8 \text{ kg:mm}^2$;

$e = 5,6 \text{ kg:mm}^2$;

$a = 24$ pour 100.

» Bien que l'essai de traction ne donne pas des résultats optima, il ne faut pas oublier que l'essai est fait sur un métal brut de fonderie; on voit que 0,5 pour 100 de fer sont nécessaires pour obtenir une haute résilience.

» Le jet ainsi obtenu accusait une teneur en fer de :

$\text{Fe} = 0,20$ pour 100.

et sa résistivité, après forgeage et recuit, était :

$\rho = 3,20 \text{ microhms-cm}^2\text{:cm.}$

» On a pu obtenir des jets contenant $\text{Fe} = 0,12$ pour 100 et ayant une résistivité de $2,00 \text{ microhms-cm}^2\text{:cm.}$

» De plus, nous avons fait des essais assez suivis de pièces moulées en utilisant ce procédé. Les résultats sont excellents lorsqu'il s'agit de moulages assez simples. Il suffit d'employer des refroidisseurs, comme dans la coulée du bronze d'aluminium. Mais s'il est question de pièces nécessitant des noyaux complexes, ceux-ci doivent souvent être métalliques. On éprouve alors les plus grandes difficultés à enlever ces noyaux et l'on note dans leur voisinage des petites criques. Il y a là un complément d'étude nécessaire afin d'atteindre entièrement le but visé.

*Autres essais avec additions finales autres que le fer
et le carbure de bore.*

» En même temps que nos premiers essais avec le carbure de bore, nous avons poursuivi des expériences avec quelques autres corps qui nous semblaient pouvoir donner des résultats intéres-

sants, à savoir : calcium, sodium, phosphore, aluminium, magnésium, plomb, zinc, cadmium, arsenic, cerium, silicium.

» Malheureusement, dans tous ces essais, nous avons utilisé pour opérer une cuiller de fer. Nous avons obtenu, dans tous les cas, des résultats intéressants; mais il nous est impossible d'indiquer la part qui revient au fer et celle qui revient au produit utilisé.

» Ces essais sont donc à reprendre; car certaines additions peuvent ne pas présenter l'inconvénient du fer, au point de vue diminution de la résistivité.

» Cependant, avec le sodium et le calcium, notre étude a été poussée plus loin.

» Nous avons fait deux séries d'expériences. Dans la première, l'agitation a été produite avec une cuiller de fer; dans la seconde, on a utilisé une barre de cuivre.

» Voici les résultats obtenus :

Expériences	Addition	Proportion	Résilience kgm:cm ²	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Etat du metal	Teneur en Fe	Résistivité microhm- cm:cm
1	Na	0,5 pour 100	17,5 pliée	16,7	5,7	40,5	Salin	0,22	3,10
2	Na	1 —	17,4 —	10,7	3,2	14	—	0,38	4,11
3	Ca	0,5 —	17,5 —	15,8	6	32	—	0,38	4,32
4	Ca	1 —	18,0 —	19,6	5,3	49	—	0,71	3,80

Première série d'expériences.

» Dans les éprouvettes, l'analyse a indiqué des traces indosables de sodium et pas du tout de calcium.

» La résistivité a été déterminée sur métal forgé et recuit à 650° C.

Deuxième Série d'expériences.

Expériences	Addition	Proportion en centièmes	Résilience kgm:cm ²	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A centièmes	Etat du metal	Teneur en Fe	Résistivité microhm- cm:cm
5	Néant	0	1,3 rompue	11,2	5	14	Mauvais	Nulle	1,74
6	Na	0,5	0,9 —	5,6	5,4	5,1	—	0,05	1,78
7	Na	1	0,9 —	impossible	à usiner	—	—	0,03	1,76
8	Ca	0,5	0,9 —	16,7	7,3	14	—	traces	1,77
9	Ca	1	0,6 —	17,3	6,1	20	—	traces	1,79

» Ces deux séries d'essais montrent bien l'effet nul du sodium et du calcium (d'ailleurs, ce dernier est très difficile à incorporer) et l'effet du fer sur la qualité et la résistivité du métal.

Essais avec un produit spécial dit : Bore dilué dans l'alumino-borate de sodium.

» Ce produit a été mis à notre disposition par la Compagnie Thomson-Houston. Nous ne l'avons pas analysé et nous pouvons seulement indiquer qu'il est obtenu par réduction aluminothermique du borate de sodium.

» Ces essais ayant été faits avant que ne fût connu le mécanisme de la désoxydation par le fer, et l'agitation ayant été produite par une cuiller de ce métal, les résultats ont tous été intéressants.

» L'addition a varié de 0,5 à 2 pour 100 du produit ; la teneur finale en fer a été de 0,14 à 1 pour 100.

» La résistivité a varié de 2,88 à 4,16 microhms-cm²:cm.

» La dureté a été comprise entre 38 et 57 et la résilience entre 8 et 18 kg-m:cm². Les résultats sont plutôt moins nets que dans la première série d'essais.

Essais sur l'aluminium.

» Nous avons fait quelques essais avec le carbure de bore dans les mêmes conditions que la première série de nos expériences. Avec ou sans addition, les lingots sont sains. Dans aucun cas, nous n'avons noté d'amélioration très sensible des propriétés mécaniques.

Expé- riences	Proportion de carbure de bore en centièmes	Résilience kgm:cm ²	Dureté sous 500 kg	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A cen- tièmes	Σ cen- tièmes
1	0	éprouvette 1,6 rompue	29,5	5,8	2,3	4,2	
2	0,5	2,3 —	25	9,2	3,6	10,0	20,7
3	1	1,9 —	31	7,0	3,0	6,5	
4	2	1,5 —	30,5	10,4	4,0	15	24,6

» On note cependant des allongements élevés dans le dernier essai. Avec le bore dilué dans l'aluminoborate de sodium, nous avons obtenu :

Expé- riences	Proportion d'addition en centièmes	Résilience kg-m:cm ²	Dureté sous 500 kg	R kg:mm ²	E kg:mm ²	A cen- tièmes	Σ cen- tièmes
1	0,5	éprouvette 1,3 rompue	30	7,9	?	10,0	18,1
2	1	1,1 —	30	8,2	?	8,0	19,4
3	2	1,0 —	30	8,4	?	8,0	19,4

» Ces résultats ne présentent aucun intérêt.

CONCLUSIONS.

» 1° En ce qui concerne le cuivre :

» A) L'addition de carbure de bore ne produit aucun effet intéressant, du moins dans les conditions de nos essais ;

» B) L'addition de faibles quantités de fer (0,30 pour 100 environ), d'ailleurs un peu variables avec les conditions de fusion et de coulée, produit une désoxydation complète du métal et permet d'obtenir des pièces très saines.

» C) Toutefois, cette addition a l'inconvénient d'augmenter un peu la résistivité du métal ;

» D) L'étude que nous avons faite des autres additions a été poursuivie en présence involontaire de fer ; nous ne pouvions donc pas affirmer que ces additions soient intéressantes ; nous reprenons ces essais.

» 2° En ce qui concerne l'aluminium :

» L'addition de carbure de bore amène, peut-être, une amélioration des allongements ; mais l'intérêt n'en est point certain. »

**RECHERCHES FAITES AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS
DE L'ALUMINIUM, par M. JOUAUST.**

M. JOUAUST. — « M. Guillet ayant fait allusion dans sa communication aux recherches poursuivies par le Laboratoire central d'Electricité sur les propriétés de l'aluminium, je désire en apporter ici les résultats.

» Ces recherches ont été entreprises à la demande de la Commission électrotechnique internationale.

» Le but que se proposait cette Commission était l'établissement, pour l'aluminium, comme il a été fait pour le cuivre, d'un métal type.

» Un premier travail avait déjà été exécuté en 1917, mais les résultats obtenus sur les aluminiums les plus purs livrés par l'industrie française indiquaient des valeurs de résistivité beaucoup plus élevées que celles obtenues en 1911 aux Etats-Unis sur des aluminiums de provenance américaine (voir « Bulletin du Bureau of Standards », tome 7, page 115).

» Il est probable que, par suite des perturbations provoquées par la guerre, l'industrie française ne se trouvait pas, en 1917, dans des conditions lui permettant d'apporter tout le soin désirable dans l'élaboration de ses produits.

» Dans ces conditions, il fut décidé que de nouveaux échantillons seraient demandés par le Laboratoire central d'Electricité (L. C. E.) aux industriels français producteurs d'aluminium. Un certain nombre des éprouvettes reçues devaient être envoyées au National physical Laboratory, en Angleterre, et au National Bureau of Standards, à Washington, le Laboratoire en conservant un certain nombre pour ses propres recherches, qui devaient porter également sur des aluminiums de provenance étrangère et que les deux autres laboratoires devaient lui envoyer.

» Aucun échantillon anglais n'ayant été reçu, les recherches ont porté uniquement sur les échantillons français et américains.

» Voici, en résumé, les résultats de ces recherches.

» **SPÉCIFICATION DES ÉPROUVETTES.** — *Aluminiums français.* — La Société de l'Aluminium Français a fourni au laboratoire deux variétés d'aluminium : l'une qualifiée extra pure, l'autre pure.

» Les éprouvettes correspondant à chacune des variétés étaient livrées sous deux états: 1° aluminium recuit, 2° aluminium écroui à 97 pour 100.

» Nous donnons ci-dessous les analyses chimiques des deux variétés et, à titre de comparaison, les résultats des analyses faites au National physical Laboratory (N. P. L.) sur les échantillons qui lui avaient été envoyés.

	Extra pur		Pur	
	L. C. E.	N. P. L.	L. C. E.	N. P. L.
Si	0,16	0,11	0,47	0,47
Cu	»	»	traces	traces
Fe	0,18	0,12	0,51	0,48
Al	99,66	99,77	99,02	99,05

» *Aluminiums américains.* — Les échantillons étaient au nombre de quinze.

» D'après les indications fournies par le « Bureau of Standards », ces échantillons étaient susceptibles de représenter la fabrication normale de l'Aluminium Co of America. En Angleterre, on a trouvé qu'ils contenaient 99,5 pour 100 d'aluminium.

» Les échantillons américains n'ont pas été analysés en France.

» Toutes ces éprouvettes étaient constituées par des barres cylindriques d'environ 1 mètre de longueur et de 0,20 centimètre de diamètre.

» Par suite d'une erreur, le Laboratoire central d'Electricité n'a pas conservé d'éprouvette correspondant à la variété « pur recuit ».

» **RÉSULTATS DES MESURES.** — Dans le tableau qui va suivre, nous donnerons : 1° la résistivité ρ_{20} à 20 degrés centésimaux évaluée en microhms-centimètre, 2° le coefficient de variation de résistance avec la température à 20°, c'est-à-dire le coefficient α de la formule

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$$

permettant de calculer la résistance R_t à t degrés d'un conducteur d'aluminium en fonction de sa résistance R à 20° ; 3° le produit $\alpha \rho_{20}$.

Aluminiums français.

	Résistivité ρ_{20}	Coefficient de variation α	Produit $\alpha \rho_{20}$
Extra pur recuit {	1 2 801	0,00407	0,01139
	2 2 792	0,00412	0,01150
Moyenne	2 795	0,00409	0,01144
Extra pur écroui {	1 2 811	0 00410	0 01152
	2 2 802	0,00416	0 01165
Moyenne	2 806	0 0 413	0,01158
Pur écroui {	1 3,084	0,00369	0 01138
	2 3,092	0,00366	0 01132
	3 3,079	0,00378	0 01137
	4 3,090	0,00372	0 01141
Moyenne	3,083	0,00371	0,01139

Aluminiums américains.

	ρ_{20}	α	$\alpha \rho_{20}$
1.	2 820	0,00417	0,01148
2.	2 837	0,00410	0,01163
3.	2 842	0,00405	0,01151
4.	2 827	0 00404	0,01142
5.	2 833	0,00402	0,01135
6.	2 843	0,00396	0 01126
7.	2 830	0,00404	0,01143
8.	2 834	0,00409	0,01159
99.	2 835	0,00409	0,01159
10.	2 841	0,00396	0,01125
11.	2 835	0,00404	0,01143
12.	2 815	0,00410	0,01154
13.	2 812	0,00409	0,01150
14.	2 827	0,00410	0,01151
15.	2 815	0 00410	0,01154
Moyenne	2 829	0,00405	0,01147

» RÉSULTATS ÉTRANGERS. — Pour permettre d'apprécier la valeur des mesures indiquées ci-dessus, nous donnons comparative-

ment les moyennes des résultats obtenus sur chaque variété d'aluminium au National physical Laboratory et au Laboratoire central d'Electricité.

	N. P. L.		L. C. E.	
	ρ_{20}	α	ρ_{20}	α
Extra pur recuit	2,785	0,00408	2,795	0,00409
Extra pur écroui	2,786	0,00409	2,806	0,00413
Pur recuit	3,072	0,00371		
Pur écroui	3,084	0,00369	3,083	0,00371
Américain	2,834	0,00403	2,829	0,00405

» INFLUENCE DU RECUIT. — Comme on le voit, il semble n'exister que peu de différence entre les propriétés du même métal avec l'état d'écrouissage dans lequel il est livré au commerce et l'état de recuit.

» Aucun renseignement n'ayant été fourni sur l'état des échantillons américains, deux de ceux-ci ont été recuits par les soins de la Société de l'Aluminium français. Loin de constater une diminution de la résistance, on a constaté une augmentation assez notable de 2 pour 100 environ.

» Il est possible que des précautions suffisantes n'aient pas été prises pendant le recuit et que le métal ait été altéré.

» Il est à remarquer toutefois qu'au National physical Laboratory, où des expériences sur le recuit ont également été faites, le recuit a eu pour effet d'augmenter de 1,2 pour 100 la résistivité des éprouvettes américaines.

Pour les éprouvettes françaises et anglaises, les différences n'atteignaient que quelques millièmes.

Il semble donc qu'au point de vue résistivité, il n'y ait pas de différence entre le métal recuit et le métal écroui tel qu'il est livré par les usines.

» ALUMINIUM DE FABRICATION ANGLAISE. — Comme il a été dit plus haut, le Laboratoire central d'Electricité n'a pas reçu d'éprouvettes du National physical Laboratory. Mais, dans une note reçue du National physical Laboratory, nous trouvons des résultats sur des aluminiums de fabrication anglaise.

» La moyenne des mesures effectuées conduit aux résultats suivants.

Aluminium recuit		Aluminium écroui	
ρ_{20}	α	ρ_{20}	α
2,812	0,00403	2,825	0,00400

» D'après l'analyse fournie, ces métaux contenaient 99,7 pour 100 d'aluminium.

» REMARQUES SUR LES RÉSULTATS OBTENUS. — Ces résultats justifient la remarque placée en tête de ce travail que le Laboratoire central d'Electricité avait raison de suspecter les résultats obtenus dans son travail de 1917 qui conduisait, pour des variétés extra-pures sur des aluminiums français, à des résistivités de l'ordre de 2,9 microhms-centimètre, valeur bien supérieure à celles obtenues par les laboratoires étrangers.

» On constate, au contraire, une bien meilleure concordance entre les diverses mesures indiquées ci-dessus.

» Il semble qu'on pourrait adopter pour la résistivité, à 20° centésimaux, de l'aluminium type livré à l'état écroui, la valeur 2,820 microhms-centimètre.

» COEFFICIENT DE VARIATION AVEC LA TEMPÉRATURE. — Si nous envisageons les diverses valeurs du produit $\alpha \rho_{20}$ indiquées dans les tableaux précédents, nous trouvons pour moyenne 0,01147 avec des valeurs extrêmes de 0,01125 et 0,01165.

» Les résultats obtenus au National physical Laboratory conduisent à une valeur moyenne de 0,01139. (1)

» Ces écarts sont plus élevés que ceux obtenus par DELLINGER pour le cuivre. Dans les résultats publiés par ce dernier, les écarts obtenus entre les diverses valeurs du produit n'atteignent pas 1 pour 100.

» Ici nous avons des écarts de mesures isolées par rapport à la moyenne atteignant 2 pour 100.

(1) Rappelons que les mesures effectuées à la demande du Comité électrotechnique italien, par le professeur Grassi, avaient conduit pour le produit $\rho_{20} \alpha$ à la valeur 0,01141.

» Il faut toutefois remarquer qu'il s'agit d'écart_s portant sur des mesures isolées,

» Il ne faut pas oublier d'autre part que, malgré les précautions prises dans leur expédition, les différentes éprouvettes avaient très bien pu être soumises à des écrouissages locaux susceptibles d'influer d'une façon particulière sur leur résistivité.

» Il semble donc bien qu'on puisse admettre pour l'aluminium, comme on l'a fait pour le cuivre, la constance du produit $\alpha \rho_{20}$.

» Il importe, en outre, de remarquer que, si on utilise cette constance du produit $\alpha \rho_{20}$ pour déterminer la résistance d'un conducteur d'aluminium à 120°, connaissant sa résistance à 20°, l'erreur entraînée sur la valeur de cette résistance par une erreur de 2 pour 100 sur la valeur de $\rho_{20} \alpha$ serait inférieure à 1 pour 100.

» Il semble donc qu'on puisse poser comme règle avec une approximation suffisante pour les besoins de la pratique que, pour tous les aluminiums industriels, le produit $\alpha \rho_{20}$ est égal à 0,01145.

» Si on admet, comme nous l'avons proposé plus haut, la valeur de 2,82 microhms-centimètre pour résistivité à 20° de l'aluminium type, cela conduirait à admettre pour coefficient de variation avec la température à 20° et pour cet aluminium type : 0,00406.

» ESSAIS MÉCANIQUES. — Le tableau ci-après donne les résultats des essais mécaniques effectués au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, sur quelques-unes des éprouvettes étudiées au point de vue électrique au Laboratoire central d'Electricité.

Nature de l'éprouvette	Diamètre mm	Section mm ²	Longueur totale m	Contrainte de rupture kg.mm ²	Allongement centièmes	Contrainte limite apparente d'élasticité kg.mm ²
Américaines :						
1	2,10	3,46	1,22	14,7	2	12,1
2	2,10	3,46	1,22	15	1,8	13,8
Françaises :						
Extra pur recuit 2	2	3,14	1,15	7,6	2,8	4,6
Extra pur écroui 2	2	3,14	1,15	13	1,7	9,5
Pur écroui 2	2	3,14	1,14	18,3	1,0	15,3

ANNEXE

» Comme il a été signalé au cours de ce rapport, le Laboratoire n'avait pas conservé d'échantillon d'aluminium pur recuit.

» La Société de l'Aluminium Français a bien voulu nous fournir de nouvelles éprouvettes, mais le métal ne provenant pas de la même coulée que celui utilisé dans les expériences internationales, nous n'avons pas cru devoir faire figurer dans le tableau général les résultats obtenus, pour éviter toute comparaison inexacte.

» Les résultats fournis par ces nouveaux échantillons ont été les suivants :

Aluminium pur recuit.

	ϵ_{10}	α	$\alpha \epsilon_{10}$
1	2,55	0,00367	0,0108
2	2,90	0,00377	0,0109

» Les essais mécaniques effectués par les soins du Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers ont donné :

Diamètre mm	Section mm ²	Longueur totale m	Contrainte de rupture kg/mm ²	Allongement Centièmes	Contrainte limite d'élasticité kg/mm ²
2	3,14	1,20	12,1	22	5,4
—	—	—	13,7	25	6,0

**MÉTHODES D'ESSAIS DES APPAREILS TÉLÉPHONIQUES : POSTES D'ABONNÉS,
MICROPHONES, RÉCEPTEURS.**

Les essais décrits dans cet article sont effectués couramment au laboratoire d'études et de recherches techniques des Postes et Télégraphes sur les appareils téléphoniques de types nouveaux présentés à l'Administration des P. T. T. en vue de leur admission sur les réseaux téléphoniques français. Ces essais permettent de s'assurer que les appareils téléphoniques sont satisfaisants à tous les points de vue qui intéressent les services d'exploitation téléphonique.

**I. — ESSAI DES APPAREILS TÉLÉPHONIQUES D'ABONNÉS : APPAREILS A
MICROPHONE FIXE OU APPAREILS A MICROTÉLÉPHONE COMBINÉ.**

M. G. VALENSI. — « Les essais ou mesures électriques que l'on effectue en général pour se rendre compte de la valeur électrique d'un appareil téléphonique d'abonné (qu'il s'agisse d'un appareil à microphone fixe ou d'un appareil à microtéléphone combiné) sont les suivants :

- » 1° Essai d'efficacité à la transmission et à la réception.
- » 2° Essai d'articulation ou de netteté (tant à la transmission qu'à la réception).
- » 3° Etude de l'amorçage d'oscillations par couplage acoustique ou mécanique du microphone et du récepteur d'un microtéléphone combiné (Effet de Larsen).
- » 4° Essai de brûlage du microphone dans toutes les positions.
- » 5° Mesure de l'effet local, par lequel on s'entend parler soi-même plus ou moins fortement. Cet effet local tient compte du couplage électrique entre le microphone et le récepteur.
- » 6° Etude de la variation de l'efficacité de l'appareil en fonction de la distance du microphone à la source sonore et sensibilité du microphone aux bruits extérieurs.
- » 7° Mesure de l'impédance du poste téléphonique dans les conditions normales de conversation et à la pulsation 5 000, en vue d'apprécier la bonne adaption du poste téléphonique aux lignes du réseau français.
- » 8° Etude de la variation de résistance du microphone en courant continu dans les conditions de travail et dans les conditions de repos.
- » 9° Essais de durée (à la fois mécaniques et électriques).
- » 10° Variation de l'efficacité à la transmission et à la réception en fonction de la longueur de la ligne d'abonné. On utilise successivement des lignes d'abonnés de résistances 50,300 et 500 ohms.

Cet essai est particulièrement important pour les postes dont le microphone et le récepteur sont montés en série (récepteurs électromagnétiques sans aimant permanent).

» 11° Variation de la netteté lorsque l'affaiblissement de la ligne fixe interurbaine, à travers laquelle on cause, augmente de la valeur 3 aux valeurs 4 et 5.

» 12° Humidification, c'est-à-dire exposition du poste téléphonique dans un endroit très humide pendant plusieurs jours (45 jours par exemple).

» Voici quelques détails techniques sur ces différents essais ou mesures :

» I. ESSAIS D'EFFICACITÉ. — Ces essais ont pour but de donner, par comparaison auditive avec des appareils étalons (microphone Solid Back et récepteur Bell), la valeur de la puissance des microphones et de la sensibilité des récepteurs téléphoniques. Le mode opératoire est le suivant :

» Nous définirons en premier lieu ce qu'on doit entendre par efficacité d'un microphone ou d'un récepteur ou d'un poste d'abonné complet à la transmission et à la réception; puis, nous indiquerons succinctement le principe de leurs mesures et, enfin, nous décrirons en détail l'installation et le mode opératoire utilisés dans ces essais.

» Il convient auparavant de définir une communication téléphonique type, comportant une ligne de transmission type, choisie comme ligne étalon. Cette communication-type est le « *circuit standard de transmission* », et cette ligne étalon est le « *câble standard*. »

» Le câble standard admis par le Comité technique international est, par définition, constitué par des conducteurs ayant les constantes suivantes par mile (c'est-à-dire par longueur de 1 609 mètres) pour la fréquence de $\frac{5\,000}{2\pi}$ périodes par seconde, ces valeurs étant données pour la boucle constituée par les deux fils : résistance $R = 88$ ohms; capacité $C = 0,054$ microfarads; perte $G = 1,10^{-6}$ mho; inductance $L = 0,001$ henry, ce qui donne une impédance caractéristique $Z_0 = 571,4$ ohms $\sqrt{43,06}$ et une constante de propagation $\gamma = 0,10616 + j\,0,11193$ (et par suite une constante d'affaiblissement de 0,106 environ par mile).

» Ce câble standard ressemble à un grand nombre de câbles

utilisés pratiquement dans les réseaux urbains de lignes d'abonnés. On établit des lignes artificielles dont chaque élément est composé de résistances ayant une faible inductance et de condensateurs ayant une faible perdite (fig. 1).

» Les éléments ainsi établis représentent 0,5 mile, 1 mile, 2 miles de câble standard, cette représentation étant valable pour les opérations électriques effectuées à partir des extrémités soit de la ligne réelle, soit de la ligne artificielle correspondante. Ces éléments sont groupés dans une « boîte de câble standard » permettant de réaliser toutes les combinaisons de 0,5 à 30 miles de câble standard, par exemple.

» Le circuit standard de transmission représente une communication téléphonique interurbaine entre deux postes d'abonnés à batterie centrale, reliés par 30 miles de câble standard (ce qui

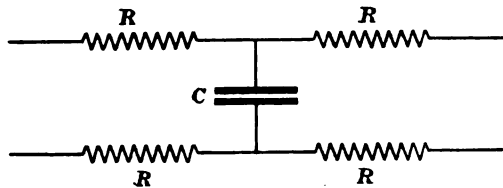


Fig. 1. — Schéma de ligne artificielle comprenant des résistances R à faible inductance et des capacités C à faible perdite.

correspond environ à une communication d'affaiblissement 3, c'est-à-dire à une bonne communication interurbaine). Chaque poste d'abonné du circuit standard comprend : un récepteur Bell de 60 ohms, un transmetteur ou microphone Solid back, une bobine d'induction ayant des enroulements de résistances de 17 ohms et 26 ohms, un condensateur d'une capacité de 2 microfarads et une sonnerie magnétique de 1 000 ohms de résistance.

» La ligne de chaque abonné est représentée par une résistance de 300 ohms.

» En outre, des organes de bureau central téléphonique figurent aux deux extrémités du câble standard servant de ligne interurbaine. Ces organes sont ceux qui subsistent dans le circuit de conversation d'un dicorde de groupe interurbain : un relais de supervision de 70 ohms de résistance, shunté par une résistance non inductive de 30 ohms; une bobine toroïdale, ou trans-

lateur téléphonique, à 4 enroulements, dont chacun a 22,5 ohm. de résistance et enfin une batterie d'accumulateurs de 24 volts, figurant la batterie centrale téléphonique.

» Le circuit standard de transmission et le câble standard étant choisis, voici comment l'on définit l'efficacité d'un microphone, d'un récepteur ou d'un poste complet.

» L'efficacité d'un microphone est par définition le nombre de miles de câbles standard qu'il faut mettre en série avec ce microphone ou avec le microphone étalon pour que, lorsqu'on parle alternativement avec ces deux microphones à l'une des extrémités de la communication-type, c'est-à-dire du « circuit standard de

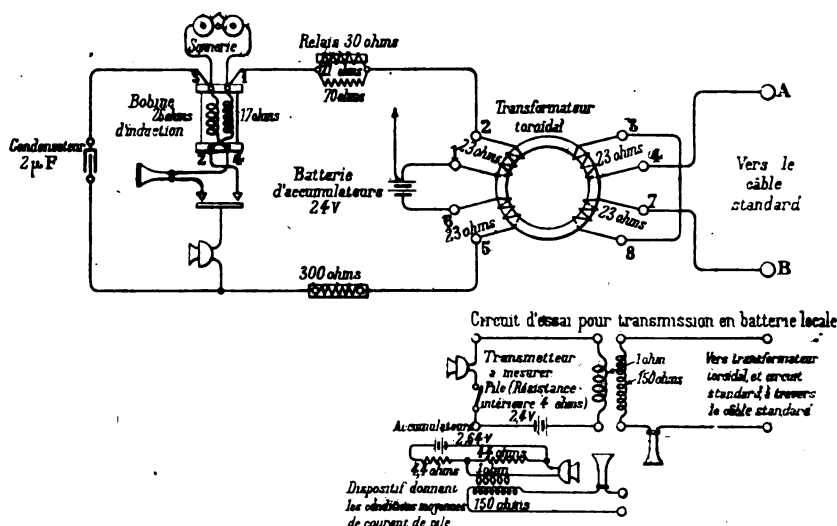


Fig. 2. — Schéma de circuit standard de transmission.

transmission », on constate la même audition dans le récepteur placé à l'autre extrémité de cette communication-type.

» Cette efficacité est positive ou négative, suivant que les miles de câble étalon supplémentaires doivent être mis du côté du microphone essayé ou du côté du microphone étalon, c'est-à-dire suivant que le microphone essayé est meilleur ou plus mauvais que l'étalon.

» La mesure de cette efficacité se fait de la manière suivante : on parle successivement dans le microphone essayé et dans le microphone étalon, qui sont désignés simplement par les numéros 1 et II et qu'on peut d'ailleurs inverser au cours des essais, à l'insu

de l'opérateur qui écoute. Au moyen d'un commutateur (soit un inverseur mécanique, soit un ensemble d'électroaimants formant dispositif de commutation électrique), on passe du circuit standard, c'est-à-dire de la communication-type, à une communication qui ne diffère de celle-ci que par la substitution du microphone à essayer au microphone étalon et par l'adjonction ou la suppression de x miles de câble standard. Des lampes de signalisation I et II préviennent celui qui écoute du passage d'une position à l'autre; son rôle consiste simplement à écouter et à dire si I est meilleur que II ou si I est pire que II. Il ne sait pas ni ce qu'est le microphone I, ni ce qu'est le microphone II, ni à travers quelle longueur $(30 + x)$ miles de câble standard il écoute dans chaque cas.

» Par un mode opératoire très simple, analogue au réglage du tir des artilleurs, on parvient automatiquement à encadrer les conditions d'équilibre d'audition : on trouve par exemple la « fourchette » entre $(x - 1)$ miles et $(x + 1)$ miles. L'efficacité relative du microphone essayé par rapport au microphone étalon est alors par définition x miles de câble standard (à 1 mile près).

» On définit et on mesure de la même manière l'efficacité d'un récepteur, ou l'efficacité d'un poste téléphonique complet à la transmission ou à la réception.

» L'efficacité à la transmission d'un poste complet est le nombre de miles de câble étalon qu'il faut mettre en série avec ce poste complet pour que, lorsqu'on parle toujours de la même manière à une extrémité de la communication-type, soit dans le microphone de ce poste, soit dans le microphone d'un poste étalon complet (dont tous les organes et dont le montage sont étalonnés), on ait la même audition à l'autre extrémité dans le récepteur étalon d'un poste étalon complet.

» L'efficacité à la réception d'un poste complet se définit de même.

» La mesure globale de l'efficacité d'un poste complet à la transmission et à la réception fournit des renseignements qui intéressent vraiment les services d'exploitation de l'Administration des Postes et des Télégraphes.

» Avant de décrire en détails l'installation d'essais d'efficacité des appareils téléphoniques, soulignons d'un mot l'utilité de ces essais et la signification pratique des résultats auxquels ils conduisent.

» Ils permettent de constater que certains types d'appareils sont uniformément de 8 à 9 miles moins efficaces que les appareils étalons absolus, ce qui signifie que l'appareil étalon donne, à travers 38 ou 39 miles de câble standard, une audition aussi bonne que l'appareil à essayer à travers 30 miles de câble standard.

» Cette différence de 9 miles de câble étalon entre les deux appareils correspond, au point de vue de l'affaiblissement, à une longueur de $9 \times 63,1$ km de circuit en fil de 5 mm de diamètre, soit à peu près le circuit Paris-Bordeaux. Si donc nous prenons deux abonnés de Paris causant alternativement à un abonné de Lille par le même circuit, mais utilisant l'un l'appareil à microphone Solidback étalon et l'autre un appareil pire de 9 miles de câble standard, tout se passera comme si le premier parlait à Lille à partir de Paris, tandis que le second parle à Lille à partir de Bordeaux.

» *Description de l'installation.* — L'installation d'essais d'efficacité comporte : une cabine pour l'opérateur qui parle, une cabine pour l'opérateur qui écoute, une table pour la manœuvre du câble réglable.

» La cabine de l'opérateur qui parle comporte deux positions de microphone, un poste d'abonné étalonné (comprenant une sonnerie, un condensateur, une bobine d'induction), une résistance de 300 ohms représentant ⁽¹⁾ une ligne normale d'abonné et les organes de bureau en batterie centrale intégrale ⁽²⁾. Un commutateur permet de mettre alternativement les microphones en circuit.

» La cabine de l'opérateur qui écoute comporte deux positions de récepteurs, un poste d'abonné étalonné (avec sonnerie, condensateur et bobine d'induction), une résistance de 300 ohms figurant la ligne d'abonné, les organes de bureau en batterie centrale intégrale. Un premier commutateur permet de mettre en circuit l'un ou l'autre écouteur; un deuxième commutateur permet de signaler les résultats obtenus, en allumant une des trois lampes placées devant l'observateur du câble réglable.

A la table du câble réglable, le troisième opérateur dispose d'un commutateur bavarois dont nous verrons le rôle, un commutateur d'inversion pour les essais de microphones et la boîte de

(1) Cette résistance de 300 ohms a aussi pour but d'éviter une détérioration du transmetteur par un courant excessif.

(2) Ces organes de bureaux comprennent une bobine toroïdale (transformateur téléphonique de rapport égal à 1) et un relais de supervision.

câble variable. Le câble fixe (30 miles de câble standard), intercalé à demeure dans le circuit de conversation, est placé dans une boîte disposée également sur la table du câble réglable.

» Le câble variable permet d'obtenir l'équilibre entre l'appareil à essayer et l'appareil-étalon en s'intercalant dans le circuit chaque fois que le commutateur est sur la position qui correspond à l'appareil le meilleur.

» Le commutateur bavarois permet à l'opérateur du câble réglable, précisément de placer ce câble variable en série avec l'appareil à essayer, cette opération se faisant d'ailleurs à l'insu de l'opérateur qui écoute. A cet effet, ce commutateur bavarois est monté sur l'alimentation d'un groupe de huit relais à contacts de platine, commandés à distance par l'opérateur qui parle (dans le cas des essais de microphones) ou par l'opérateur qui écoute (dans le cas des essais de récepteurs); quatre de ces relais mettent en circuit le câble variable (relais de mise en circuit), les quatre autres établissent une liaison métallique directe (relais de rupture).

» Le commutateur d'inversion des microphones, à l'insu de l'opérateur qui écoute, assure une garantie supplémentaire d'impartialité. La manœuvre d'inversion est faite à la table du câble réglable, une lampe « inverse » prévenant l'opérateur qui parle.

» Le panneau de signalisation de la table du câble réglable comporte trois lampes : M (meilleur), P (pire), = (égalité), que l'opérateur qui écoute allume à distance pour signaler que l'appareil est meilleur que l'étalon, ou pire, ou qu'il y a égalité entre les deux appareils.

» La figure 3 représente schématiquement l'installation en supposant, pour fixer les idées, qu'on procède à un essai de microphone.

» *Mode opératoire pour les essais de microphones.* — Pour connaître la valeur d'un microphone, on le compare, avons-nous dit, à un transmetteur préalablement étalonné et dont l'efficacité, en miles de câble standard, est connue par rapport à celle de l'étalon absolu. (1)

(1) Ces essais de microphones sont effectués pour comparer les microphones étalons secondaires (ou étalons de travail utilisés couramment) aux microphones étalons primaires (ou étalons absolus de référence, qui sont normalement inutilisés et conservés dans une armoire spéciale maintenue à température constante et dans un état hygrométrique invariable).

» Le premier opérateur parle dans l'appareil I, appareil à essayer, manœuvre son commutateur et parle ensuite dans l'appareil II, microphone étalon. La manœuvre du commutateur a, en plus, pour effet d'actionner les relais, substituant ainsi le câble variable à la liaison métallique directe ou inversement; en même temps, la lampe « I parle », qui était allumée devant l'opérateur

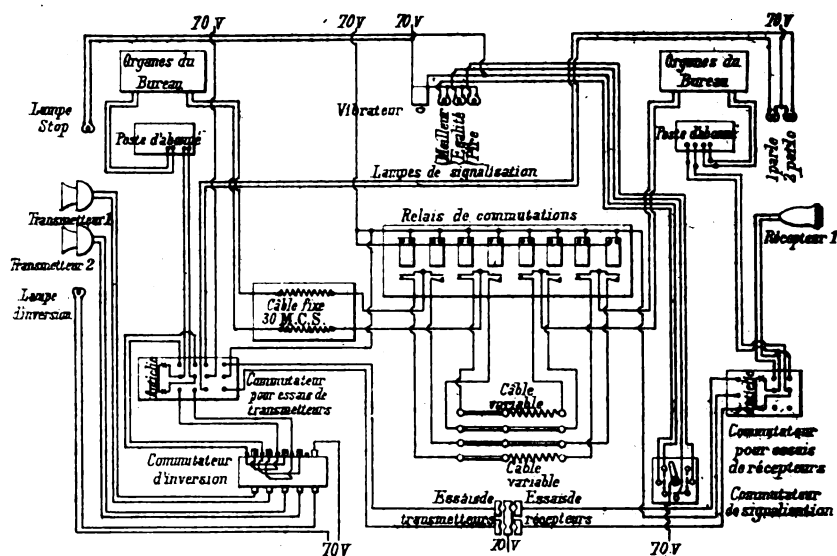


Fig. 3. — Schéma d'une installation d'essais d'efficacité des appareils téléphoniques.

qui écoute, s'est éteinte, et la lampe « Il parle » s'est allumée. En outre, pendant la commutation, le récepteur de l'opérateur qui écoute est court-circuité par un dispositif d'« anticlic », le passage d'une position à l'autre ayant lieu ainsi sans bruit de décharge dans le récepteur de celui qui écoute, l'écoute, rendue de ce fait moins pénible, peut se faire d'une façon plus attentive et les résultats obtenus sont plus exacts.

» Devant chaque appareil, l'opérateur qui parle prononce les mots suivants: « Paris, Bordeaux, Le Mans, Saint-Leu, Léon, Loudun »; cette phrase groupe douze sons différents, les plus usuels parmi les quinze sons principaux que comporte la langue française. Ces mots doivent être prononcés avec le même volume et la même intonation de voix et la position prise devant chacun des appareils doit toujours être la même, de façon que l'essai soit fait

dans des conditions absolument identiques pour les deux appareils, l'opérateur qui parle prenant devant chacun d'eux la position que l'on doit prendre dans une conversation banale.

» L'opérateur qui écoute apprécie la valeur relative des deux transmetteurs et signale le résultat de son écoute sous la forme « I meilleur que II », ou « I pire que II », ou « égalité ». Il utilise pour cela son commutateur de signalisation. Chaque fois que ce commutateur est manœuvré, il passe sur un plot qui actionne un vibreur pour prévenir l'opérateur du câble réglable et allume une lampe « stop », pour faire s'arrêter l'opérateur qui parle. La manette de ce commutateur passe ensuite sur l'un des plots P (pire), M (meilleur) ou = (égalité).

» A ce moment, l'opérateur qui règle prend note du résultat signalé, augmente ou diminue, selon le cas, le nombre de miles pris sur la boîte du câble standard variable et prévient le premier opérateur, qui recommence à parler jusqu'à la signalisation suivante.

» Les essais sont continués ainsi jusqu'à ce que l'opérateur du câble réglable ait obtenu des chiffres qui encadrent l'équilibre sonore; la valeur du microphone à essayer en fonction de l'éta-lon utilisé s'en déduit en interpolant.

» Dans la recherche de cet encadrement, on procède comme les artilleurs, mais, quand on a trouvé ce qu'ils appellent la « fourchette », c'est-à-dire lorsqu'on a encadré à un mile près, il est utile et même nécessaire de faire des bonds d'amplitude très variable en deçà et au delà, pour confirmer le résultat trouvé et s'assurer que l'opérateur qui écoute a été à la fois attentif et impartial.

» Si la recherche de l'équilibre se faisait trop méthodiquement, comme le réglage d'un tir percutant, on pourrait craindre que l'opérateur qui écoute se laisse entraîner par cet excès de méthode et soit influencé dans son jugement. Dans le domaine sonore, comme dans le domaine visuel, on apprécie mieux la position exacte d'un point lorsqu'on se déplace largement en deçà et au delà plutôt que lorsqu'on marche toujours vers ce point en restant en deçà de ce point et en avançant à petits pas.

» Voici comment se fait un essai avec trois opérateurs :

» Chacun des trois opérateurs, A, B, C, fait deux écoutes complètes pour chaque appareil : A parlant d'abord à B et C; puis B à A et C; enfin C à A et B. On prend la moyenne entre les six

chiffres obtenus; de cette moyenne on défalque la constante de l'étalon utilisé, ce qui donne, en miles de câble standard, la valeur de l'appareil à essayer par rapport à l'étalon absolu.

» Exemple (voir tableau I) : comparaison de l'étalon secondaire n° 10 à l'étalon secondaire n° 69 (1,8 P).

» *Mode opératoire pour les essais de récepteurs* ⁽¹⁾. — Pour procéder à des essais de récepteurs, le premier opérateur parle toujours dans le même microphone, qui est un microphone Solid-back étalon ; le deuxième opérateur écoute alternativement dans le récepteur étalon et dans le récepteur à essayer. A

TABLEAU I

Opérateurs	A. B	C. B	B. C	A. C	C. A	B. A
Chiffres obtenus	+ 4 P	0 M	+ 1 M	- 6 M	+ 8 P	0 M
	0 M	+ 5 P	+ 8 P	+ 6 P	+ 8 M	+ 6 P
	+ 2 M	+ 3 P	+ 6 P	0 M	0 M	+ 2 M
	+ 3 P	- 1 M	+ 4 M	+ 2 M	+ 6 P	+ 4 P
	+ 1 M	+ 2 P	+ 5 P	+ 5 P	+ 1 P	+ 1 M
	+ 2 M	+ 1 M	+ 3 M	+ 4 P	- 1 M	+ 3 P
Résultats	+ 2,5	+ 1,5	+ 4,5	+ 3	+ 0,5	+ 2,5
Moyenne des résultats						2,4 M
Constante de l'étalon secondaire utilisé						1,8 P
Efficacité de l'appareil à essayer, par rapport à l'étalon absolu						0,6 M
NOTA. — Le signe plus signifie que les miles de câble étalon sont mis du côté de l'appareil à essayer : le signe moins du côté de l'appareil étalon.						

la main, ou par l'intermédiaire d'une pédale, il manœuvre son commutateur qui, actionnant les relais, met en circuit, avec l'un ou l'autre des appareils, une liaison métallique directe ou le câble variable. Les résultats sont interprétés de la même façon que dans les essais de microphones.

» *Mode opératoire pour les essais de postes complets*. — On compare de la même manière des postes complets soit entre eux, soit à un même poste choisi comme poste étalon.

Dans ces essais de postes complets, surtout s'il s'agit de postes

⁽¹⁾ Ces essais de récepteurs sont effectués pour comparer les récepteurs étalons secondaires (ou étalons de travail) aux récepteurs étalons primaires (ou étalons de référence).

à microtéléphones combinés, qui donnent des résultats assez différents suivant la conformation du visage des opérateurs qui parlent (notamment suivant la distance de leur bouche à leur oreille, d'où découle la distance de la bouche au microphone), il est bon d'effectuer de nombreuses mesures et de prendre la moyenne des résultats.

» Voici comment l'on procède dans ce cas :

» Les mesures d'efficacité sont faites par deux groupes de trois opérateurs et dans l'ordre suivant :

NUMÉRO DES ESSAIS	GRUPE I OPÉRATEURS A, B, C	GRUPE II OPÉRATEURS D, E, F
1	A parle à B	D parle à E
2	B — C	E — F
3	C — A	F — D
4	A — C	D — F
5	B — A	E — D
6	C — B	F — E

» Par conséquent, pour chaque appareil, on fait douze essais et on prend la moyenne des douze résultats obtenus, tant à la transmission qu'à la réception.

» L'installation de mesures d'efficacité que nous venons de décrire permet de faire tous les essais possibles, mais, dans le cas d'un essai de postes complets, elle exige qu'on transporte le poste à essayer successivement dans la cabine de l'opérateur qui parle et dans la cabine de l'opérateur qui écoute, afin de procéder à l'essai à la réception après l'essai à la transmission. Pour remédier à cet inconvénient, on peut réaliser une installation réversible qui permet de causer et d'écouter dans chacune des deux cabines.

» Les améliorations suivantes peuvent également être apportées. En premier lieu, des relais à un seul contact, reliés à des bornes facilement accessibles et groupés sur un même panneau, sont utilisés pour établir les connexions nécessaires aux mesures de comparaison de tous genres que l'on peut être amené à effectuer : essais de microphones, de récepteurs, de postes complets; mesures d'équivalents de transmission, d'organes intermédiaires, etc. Cette commutation électrique par relais présente, notamment à la réception, l'avantage d'éviter à l'opérateur la préoccupation de manœuvrer une pédale trop dure ou un commutateur bruyant, ce qui immobilise l'une des mains de l'observateur pendant toute la durée de l'écoute. La commutation électrique se

réalise facilement à l'aide d'un contact commandant l'alimentation de trois relais.

» La figure 4 représente le schéma détaillé d'une telle installation perfectionnée. Les figures 5, 6 et 7 représentent des vues photographiques de cette installation.

» Dans le cas où il est nécessaire de réceptionner un grand nombre d'appareils (ce qui est, par exemple, le cas d'un Service de

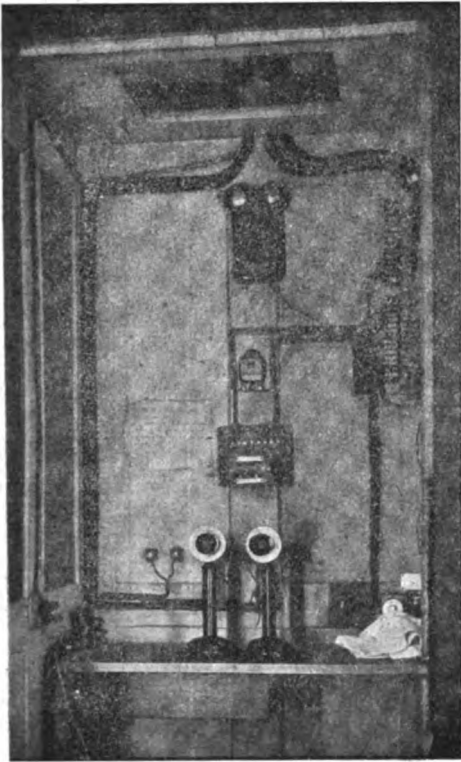


Fig. 5. — Vue de la cabine de l'opérateur qui parle.

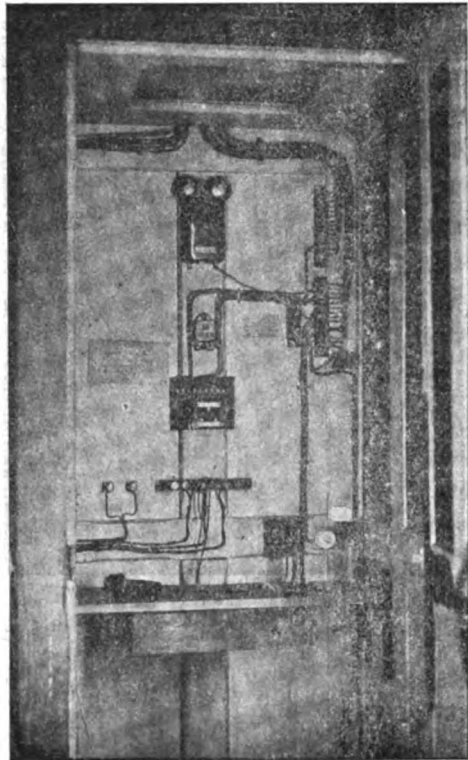


Fig. 6. — Vue de la cabine de l'opérateur qui écoute.

Vérification du Matériel), on utilise une méthode de travail plus rapide que celle que nous avons indiquée ci-dessus, et consistant par exemple à mettre le câble variable à la disposition de l'opérateur qui écoute. Cet observateur cherche l'équilibre comme on cherche le zéro au pont de Wheatstone. On peut assurer toute garantie d'impartialité en laissant à l'opérateur du câble réglable la faculté d'inverser soit l'étalon et l'appareil à essayer, soit simplement les deux lampes de la table d'écoute.

» II. — **ESSAIS DE NETTETÉ.** — Dans ces essais de netteté, deux opérateurs A et B, successivement, transmettent chacun avec le poste étudié (supposé à batterie centrale et alimenté sous 24 volts), deux listes de 50 mots prêtant à confusion, et deux autres listes de 50 mots avec le même poste alimenté sous 48 volts. Ces listes sont écoutées et transcrites par deux opérateurs C et D préposés à la réception.

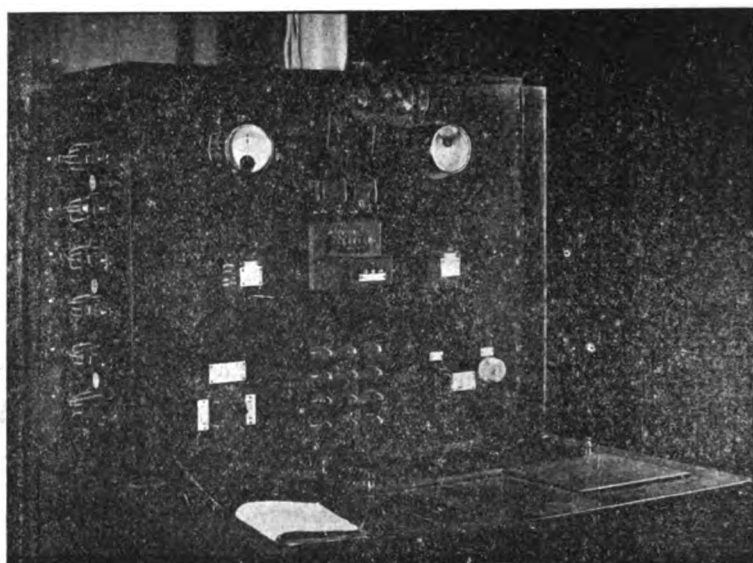


Fig. 7. — Vue de la table du câble étalon réglable.

A dicte à C une liste de 50 mots.

A	d°	D	d°
---	----	---	----

B	d°	C	d°
---	----	---	----

B	d°	D	d°
---	----	---	----

» Ces essais, faits sur une ligne artificielle, *sans déformation*, d'affaiblissement 3, sont repris ensuite avec une ligne d'affaiblissement 4 et 5.

» Le schéma de montage est semblable à celui du circuit standard de transmission, mais le câble standard est remplacé par une ligne sans déformation, les lignes d'abonnés étant figurées par des résistances appropriées.

» Lorsqu'on fait un essai de netteté à la transmission, on parle dans le microphone du poste à essayer et l'on écoute dans le ré-

cepteur du poste étalon. C'est l'inverse dans le cas d'un essai de netteté à la réception.

» Les listes de mots utilisés peuvent être constituées après une étude phonétique spéciale ou encore peuvent être formées simplement par les deux premières syllabes commençant et terminant les lignes successives d'une page d'un livre ou d'un article de journal.

» Après correction, on compare les mots dictés à ceux reçus par l'opérateur qui écoute et on obtient le pourcentage des mots correctement reçus (orthographe phonétique).

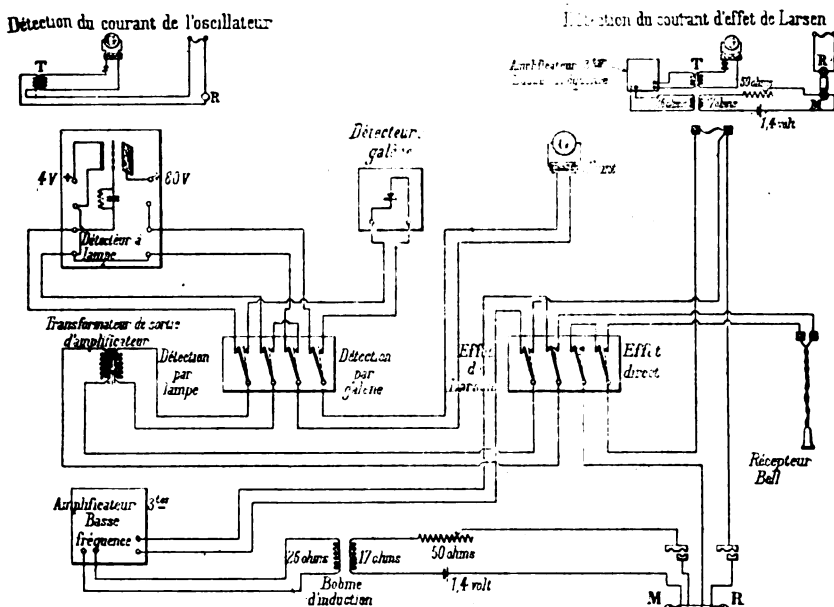


Fig. 8. — Schéma de l'installation pour la mesure de l'effet de Larsen.

» III. — ÉTUDE DU COUPLAGE ACOUSTIQUE ET MÉCANIQUE ENTRE LE MICROPHONE ET LE RÉCEPTEUR D'UN APPAREIL COMBINÉ (EFFET DE LARSEN). — La mesure du couplage acoustique, par l'air, et mécanique, par le manche, entre le microphone et le récepteur consiste à mesurer le courant produit dans le microphone par la vibration du récepteur du même microtéléphone combiné.

» On envoie dans le récepteur un courant alternatif sinusoïdal de fréquence déterminée, variable dans toute la gamme des fréquences vocales. Le microphone est fermé sur un circuit local constitué de manière à assurer une alimentation microphonique

normale. Le combiné étant laissé immobile, s'il se produit des variations de courant dans le circuit local, elles sont dues uniquement au couplage ou phénomène de Larsen. Ces variations, convenablement amplifiées avec des lampes à trois électrodes et détectées avec une lampe ou une galène, sont mesurées au moyen d'un galvanomètre sensible.

» On prend la précaution avant chaque mesure de s'assurer, grâce à une mesure au galvanomètre, à travers un écouteur témoin, que la source de courant alternatif a un débit constant quelle que soit sa fréquence.

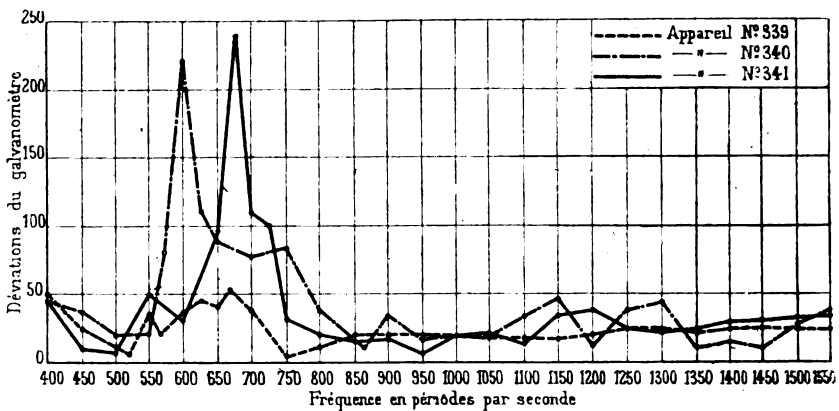


Fig. 9. — Mesure du couplage entre le microphone et le récepteur (effet de Larsen). Nota : 1 division du galvanomètre équivaut à 10 microampères de courant oscillatoire détecté dans le microphone du combiné essayé. Courbe du courant microphonique détecté en fonction de la fréquence du courant appliqué au récepteur.

» On trace la courbe des déviations du galvanomètre sous l'influence de l'effet de Larsen, en fonction des fréquences du courant alternatif injecté dans le récepteur.

» Un appareil parfait donnera une ligne confondue avec l'axe des abscisses; un appareil moyen, une ligne parallèle à cet axe et peu éloignée; un appareil défectueux, une ligne capricieuse analogue à celles de la figure 9.

» La figure 8 représente le schéma des connexions de l'installation de mesure de l'effet de Larsen.

» IV. — MESURE D'IMPÉDANCE. — Les impédances des appareils sont mesurées à l'aide du pont de Wheatstone à téléphone équipé avec un inductomètre (self-inductance étalon réglable) et une ré-

sistance non inductive réglable. Lorsque l'équilibre sonore est obtenu, les étalons de résistance et de self-inductance ont des valeurs R et L déterminées. On connaît, d'autre part, la pulsation ω de la source de courant alternatif utilisée (en général, $\omega = 5\,000$).

» Les composantes orthogonales du vecteur impédance sont, dans ces conditions, R et $L\omega$. On en déduit facilement le module Z et l'argument φ de l'impédance Z de l'appareil.

» Cette mesure est importante en vue de s'assurer de la bonne adaptation électrique des appareils aux lignes téléphoniques.

» V. — MESURE DE L'EFFET LOCAL. — La mesure de l'effet local a pour but de déterminer le rapport, à la puissance fournie par un microphone, de la puissance absorbée par le récepteur du même poste. Cet essai se ramène donc à la mesure de deux puissances. Il y aura peu d'effet local lorsque ce rapport sera très petit (de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-3}$). Il y aura beaucoup d'effet local lorsque ce rapport sera de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ et l'effet local sera énorme pour des valeurs de l'ordre de $15 \cdot 10^{-3}$.

» Une sirène fonctionne devant le microphone du poste à essayer, monté dans les conditions normales d'utilisation. On mesure avec un voltmètre sensible la différence de potentiel alternative aux bornes du microphone. Cette lecture E permet de déterminer la puissance P_m fournie par le microphone, par la formule $P_m = \frac{E^2}{R}$, dans laquelle R est la résistance du microphone en travail. On branche ensuite un voltmètre amplificateur à courant alternatif (voltmètre à lampes à 3 électrodes Abraham-Carpentier) aux bornes du récepteur du même poste et on mesure une différence de potentiel alternative U . La puissance réelle P_r absorbée par le récepteur sera donnée par

$$P_r = \frac{U^2}{Z} \cos \varphi,$$

U étant la tension lue au voltmètre amplificateur et Z , l'impédance du récepteur mesurée au pont à téléphone. En remarquant que $\cos \varphi = \frac{r}{Z}$, si r représente la résistance effective en courant alternatif du récepteur considéré, la formule ci-dessus devient :

$$P_r = \frac{U^2 r}{Z^2},$$

d'où l'on tire :

$$\text{Effet local} = \frac{P_r}{P_m} = \frac{U^2}{E^2} \frac{R r}{Z^2}.$$

» Pratiquement, on peut utiliser le même millivoltmètre amplificateur pour mesurer les quantités E et U , les quantités r et Z sont déterminées au pont de Wheatstone à téléphone, et la quantité R , résistance du microphone en travail, est déterminée par la mesure décrite d'autre part. Le millivoltmètre amplificateur est taré au moyen d'un potentiomètre alimenté par une source de courant alternatif et d'un voltmètre électrostatique d'Ayrton et Mather.

» VI. — ESSAI DE BRULAGE DU MICROPHONE. — De petits arcs peuvent s'amorcer entre les particules ou les grains de charbon contenus dans un microphone, d'où un *bruit de crépitement* qui peut gêner la conversation et un *brûlage* susceptible de détériorer le microphone.

» On apprécie l'importance de ce brûlage en comparant les bruits que produisent ces étincelles dans le microphone considéré, avec ceux, à peine perceptibles, produits dans un microphone étalon, pour différentes positions du microphone étudié et du microphone étalon. Cet étalon a été choisi parmi les microphones les moins sujets au brûlage.

» L'opérateur s'enferme dans une cabine soigneusement feutrée qui l'isole des bruits extérieurs. Au début de l'essai, il met en court-circuit, au moyen d'une clé spéciale, le microphone à essayer, et il règle une résistance variable R pour que le milliampère-mètre placé dans le circuit soit traversé par un courant de 290 milliampères, ce qui correspond à l'alimentation microphonique normale sous 24 volts dans le cas où la ligne d'abonné a une résistance nulle. Il écoute ensuite sur l'un et l'autre microphones, à étudier et étalon, en faisant varier le rhéostat R de façon à amener lentement le courant d'alimentation microphonique à zéro.

» Il substitue ensuite une batterie de 48 volts à la batterie de 24 volts, ramène le rhéostat à sa position initiale définie précédemment et recommence l'essai de brûlage sous une tension de 48 volts.

» La figure 10 représente le schéma de l'installation réalisée pour cet essai.

» VII. — MESURE DE LA RÉSISTANCE D'UN MICROPHONE EN TRAVAIL ET AU REPOS. — La méthode employée est celle du voltmètre et de

l'ampèremètre; on utilise le montage aval, la résistance intérieure de l'ampèremètre étant négligeable par rapport à celle du microphone.

» On opère dans deux conditions électriques différentes : en premier lieu, dans les conditions d'alimentation microphonique normale, le microphone étant placé sur un circuit standard complet comportant un relais de supervision, un translateur et une résistance de 300 ohms qui figurent la ligne d'abonné ; en second lieu, dans de mauvaises conditions d'alimentation du microphone, c'est-à-dire pour un courant d'alimentation du microphone de 25 milliampères.

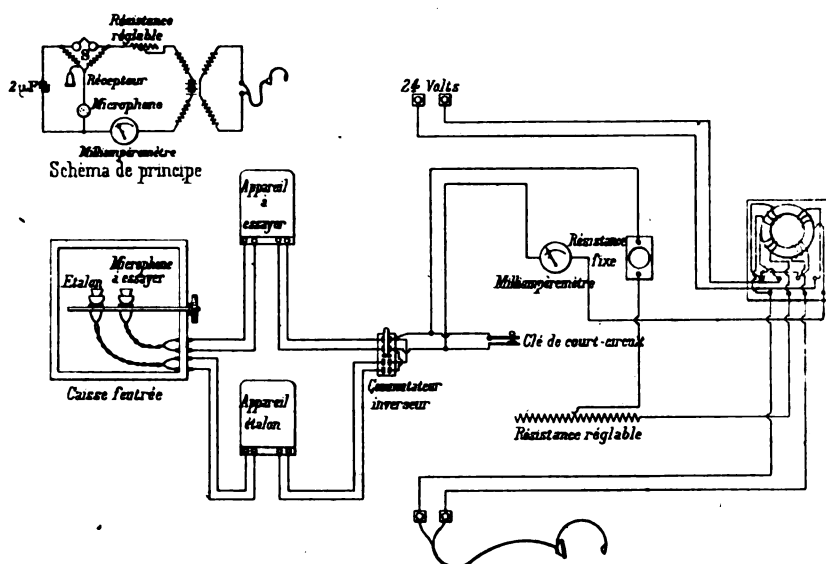


Fig. 10. — Schéma de l'installation pour essai de brûlage.

» On place toujours les microphones dans leur position géométrique normale d'utilisation.

» On mesure ainsi la résistance du microphone en travail et au repos :

» 1° *Mesure de la résistance en travail.* — Un opérateur parle devant le microphone. On note rapidement la moyenne des déviations des aiguilles du voltmètre et du milliampèremètre.

» 2° *Mesure de la résistance au repos.* — Après l'essai précédent,

on laisse reposer le microphone durant 20 secondes environ et on fait une nouvelle lecture au voltmètre et à l'ampèremètre.

» VIII. — VARIATION DE L'EFFICACITÉ EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE LE MICROPHONE ET LA SOURCE SONORE. — Cet essai a pour but de déterminer dans quelle mesure les bruits se produisant à des distances diverses d'un appareil sont recueillis et transmis par le microphone de cet appareil.

» Un ronfleur, donnant un courant d'une fréquence de 800 périodes par seconde, alimente un récepteur hurleur qui peut se déplacer devant le microphone du poste soumis aux essais.

» Le son écouté aux bornes « ligne » de l'appareil à essayer est comparé au son obtenu aux bornes d'un potentiomètre R alimenté directement par le ronfleur. Une boîte d'affaiblissement, graduée en miles de câble standard, permet d'obtenir l'équilibre d'audition et de traduire, en unités de câble étalon, la différence des intensités des deux sons. Un commutateur multiple fait passer la source de bruit et le casque d'écoute sur l'un ou l'autre des deux circuits.

» Le potentiomètre R a été réglé de la façon suivante :

» Le récepteur hurleur est placé à zéro centimètre, c'est-à-dire au contact du microphone d'un poste étalon dont l'efficacité est connue ; la boîte d'affaiblissement étant mise à zéro pendant ce réglage, on fait varier la résistance du potentiomètre R de manière à obtenir une audition égale dans les deux circuits. Le potentiomètre se comporte alors comme le microphone du poste étalon utilisé au point de vue du bruit perçu dans le récepteur d'écoute de l'opérateur. On remplace ensuite le poste étalon par le poste à essayer et l'on place le récepteur hurleur à 0, puis 5, 10, 15, etc., centimètres du microphone de ce poste à essayer ; on obtient l'équilibre d'audition pour des affaiblissements déterminés lus sur la boîte d'affaiblissement graduée en miles de câble standard ; on porte ces affaiblissements en ordonnées d'une courbe dont les abscisses sont les distances en centimètres du récepteur-hurleur et du microphone du poste essayé. Cette courbe représente la variation de l'efficacité en fonction de la distance du microphone à la source sonore.

» La figure 11 représente le schéma de l'installation utilisée.

» IX. — ESSAIS DE DURÉE. — Enfin, les appareils téléphoniques peuvent être utilement soumis à des épreuves de durée. Pour cela,

il faut disposer de deux appareils identiques A et B, l'appareil A étant utilisé à la transmission et l'appareil B à la réception. Le montage est réalisé au moyen de transformateurs téléphoniques alimentés sous 24 volts.

» Le microphone du poste A est placé sur un panneau disposé à l'intérieur d'une caisse feutrée en face de récepteurs-hurleurs. Ceux-ci sont actionnés par un commutateur tournant à trois disques, dont la vitesse est réglée pour obtenir, sur ces trois disques, des courants ondulés de pulsation 3 000, 5 000, 7 000. Ces trois courants ondulés sont mêlés dans des proportions convenables, afin de reproduire le bruit général d'une conversation, et ce mé-

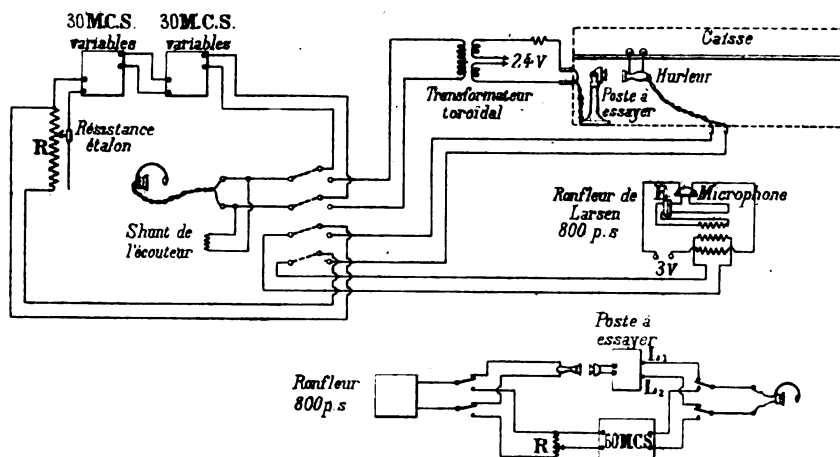


Fig. 11. — Schéma de l'installation pour la mesure de la variation de l'efficacité en fonction de la distance de la source sonore.

lange de courants actionne les récepteurs-hurleurs placés en face des microphones soumis aux essais de durée dans la boîte feutrée. Les mouvements vibratoires engendrés dans les membranes du microphone de l'appareil A créent à leur tour des courants de fréquences téléphoniques qui parviennent, à travers un transformateur, au poste d'arrivée, constitué par l'appareil B, dont le ou les récepteurs sont, par suite, constamment impressionnés.

» Pour éviter le tassement du graphite et en même temps pour éprouver la résistance mécanique des microphones ou des micro-téléphones combinés, un marteau automatique, commandé électriquement par une horloge et fonctionnant plusieurs fois par heure et à intervalles réguliers, produit des chocs sur le panneau qui supporte le microphone A.

» Pendant 162 heures, à raison de quatorze heures par jour, ces appareils A et B sont maintenus en fonctionnement constant. Au bout de ce temps, le microphone A est relié à son poste respectif (poste A) et les appareils A et B qui ont subi, soit à la transmission, soit à la réception, les essais de durée, sont à nouveau mesurés

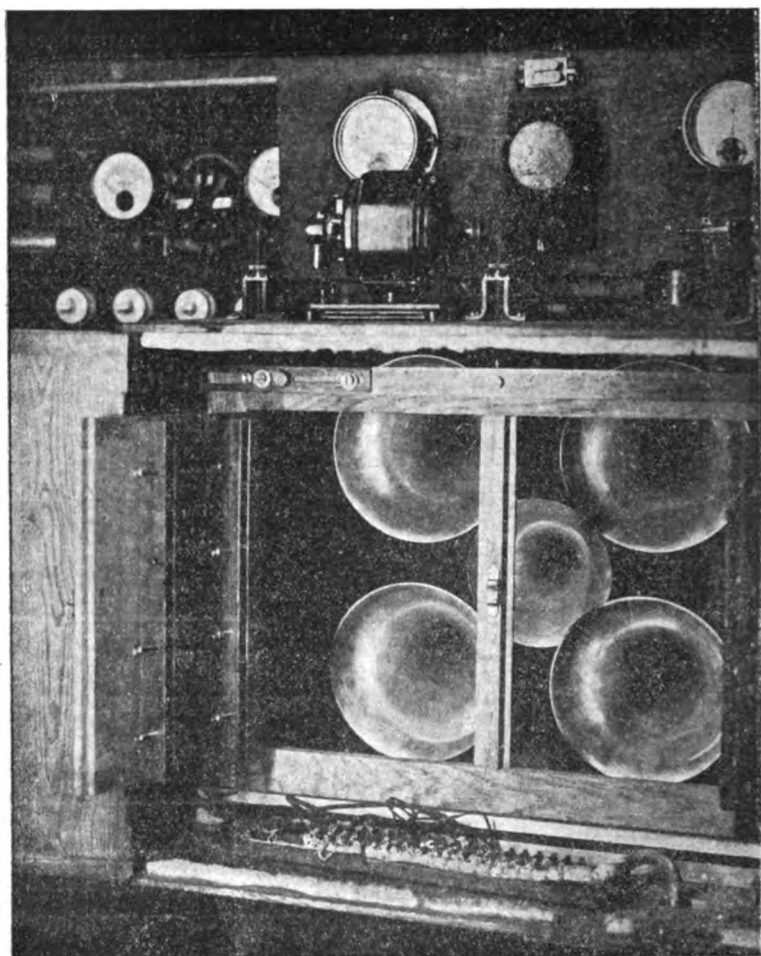


Fig. 12. — Vue de l'installation pour essai de durée.

au point de vue de l'efficacité à la transmission et à la réception.

» Après ces mesures, ces appareils A et B sont remis en position pour deux nouvelles épreuves de durée de 162 heures chacune. A l'issue de chaque période, l'efficacité est de nouveau mesurée.

» En résumé, des mesures d'efficacité sont faites avant le travail et après 162, 324 et 486 heures de travail continu, ce qui représente environ 3, 6 et 9 années de travail normal en supposant qu'un abonné échange en moyenne 2 à 3 communications de 3 minutes environ par jour (soit 10 minutes de travail par jour).

» La figure 12 représente une vue photographique de l'installation d'essai de durée.

» X. — ESSAIS APRÈS HUMIDIFICATION. — A la suite de la mesure d'efficacité faite après 486 heures de travail, il peut être utile de placer l'appareil A dans une cuve métallique au-dessus d'un brouillard d'eau vaporisée. Son microphone, laissé pendant plusieurs jours (par exemple 45 jours) dans une atmosphère saturée d'humidité, est ensuite mesuré à nouveau au point de vue de l'efficacité et de la netteté.

» Cette épreuve d'humidité est excessivement dure, puisqu'elle correspond au cas d'un appareil qui serait placé, à peine abrité de la pluie, dans une atmosphère saturée d'humidité, pendant 45 jours d'averses continuelles.

II. — QUALITÉS QUE DOIT PRÉSENTER UN BON APPAREIL TÉLÉPHONIQUE D'ABONNÉ

» Dans l'étude électrique des appareils d'abonnés, on doit se préoccuper des points de vue suivants :

» En premier lieu, l'*efficacité*. — Pour qu'un appareil d'abonné puisse constituer un type digne d'être répandu exclusivement dans tout le réseau téléphonique, aussi bien dans les installations automatiques que dans les installations manuelles, il faut que son efficacité, tant à la transmission qu'à la réception, soit : 1° *grande*, et 2° *constante*.

» Ce qu'on doit considérer, c'est l'*efficacité totale*, c'est-à-dire la somme de l'efficacité à la transmission et de l'efficacité à la réception, puisque lorsqu'un type d'appareil a été définitivement admis, c'est toujours deux appareils de ce type qui sont placés aux extrémités d'une communication téléphonique quelconque.

» Si un type d'appareil donne une transmission ou une réception qui laisse à désirer, il en résulte que l'on doit, pour assurer à toutes les communications une qualité suffisante, regagner la perte due à l'infériorité de l'appareil en employant une quantité de cui-

vre plus grande dans l'ensemble du réseau, afin de diminuer l'affaiblissement des lignes.

» Par exemple, supposons que la perte combinée due à l'emploi d'un microphone et d'un récepteur d'un certain type soit égale à 4 miles de câble standard, on peut penser regagner cette perte de 4 miles soit dans les lignes d'abonné, soit dans les lignes de jonction entre le bureau local et le bureau interurbain, soit dans les lignes interurbaines. Il est clair que la dépense entraînée par cette amélioration de ligne doit être imputée à l'emploi des mauvais appareils choisis.

» I. — Supposons que la perte doive être regagnée dans les appareils d'abonnés. Les calculs montrent que, pour regagner ces 4 miles, il faudra employer du fil de 0,8 mm de diamètre, au lieu de fil de 0,65 mm de diamètre, pour les lignes d'abonnés inférieures à 4 km, et du fil de 1,1 mm de diamètre, au lieu de fil de 0,91 mm de diamètre, pour les lignes d'abonnés comprises entre 4 et 7 km, ce qui entraîne une augmentation du poids de cuivre par kilomètre d'environ 6,3 kg dans le premier cas et 27,2 kg dans le second cas. Si nous supposons que 80 pour 100 des lignes ont une longueur moindre que 4 km et 20 pour 100 une longueur comprise entre 4 et 7 km, si nous supposons également que la longueur moyenne des premières est 4 km et la longueur moyenne des autres 5 km, il en résulte qu'en moyenne une augmentation d'environ 10,5 kg du poids de cuivre sera nécessaire par ligne d'abonné pour regagner les 4 miles dus à l'infériorité des appareils. Si le cuivre coûte 5 fr le kilogramme, cela représente une dépense, par poste d'abonné, de 53 francs. Dans un réseau de 300 000 abonnés, l'augmentation de dépense totale pour le cuivre serait de 15 300 000 francs. Ce chiffre doit être augmenté, pour tenir compte des frais de pose, qui sont plus grands lorsque les câbles de réseau sont plus gros, etc...

» II. — Il n'est pas possible de réduire suffisamment les pertes dans les lignes auxiliaires entre le bureau local et le bureau interurbain, pour regagner les 4 miles de câble standard perdus dans l'efficacité des appareils.

» III. — Supposons enfin que la perte due à l'emploi de mauvais appareils doive être regagnée dans les lignes interurbaines. Dans ce cas, au lieu d'avoir un circuit interurbain d'équivalent de transmission égal à 11 miles par exemple, ce qui est un nombre

usuel, il faudra réaliser un circuit d'équivalent de transmission de $11 - 4 = 7$ miles de câble standard.

» Supposons qu'il s'agisse d'un réseau aérien de 130 000 km de longueur totale, constitué par des lignes en fil de cuivre, sans bobines Pupin, et sans relais téléphoniques.

» Supposons que 70 pour 100 de ces lignes aient une longueur moyenne de 200 km, et 30 pour 100, une longueur moyenne de 500 km. Quelle serait, dans ce cas, la quantité de cuivre nécessaire pour compenser la perte de 4 miles de câble standard due à l'infériorité des appareils d'abonnés ?

» Pour les lignes de 200 km, on obtiendra des équivalents de transmission voisins de 7 et 11 miles respectivement, avec du fil de 3 mm et de 2,25 mm de diamètre, ce qui correspond à des poids de cuivre respectifs de 25 100 kg et de 14 150 kg. Pour des lignes de 500 km, on obtiendra ces mêmes équivalents de transmission en employant des fils de 5,5 mm et de 4 mm de diamètre, ce qui correspond à des poids de cuivre respectivement de 211 000 kg et 111 700 kg.

» L'augmentation de dépense en cuivre est donc, pour une ligne courte, de 10 950 kg, soit, à 5 fr par kilogramme, 54 800 francs, et pour une ligne longue, 99 300 kg, soit, à 5 fr par kilogramme, 497 000 francs.

» Si on suppose que le réseau total comprenne 314 lignes de 200 km et 134 lignes de 500 km, la dépense supplémentaire totale en cuivre serait de 84 millions de francs.

» Si le nombre des lignes d'abonnés est de 300 000, l'augmentation totale de dépense par poste, qui doit être imputée à l'infériorité des appareils d'abonnés, est donc de 84 millions divisés par 300 000, soit 280 francs.

» En réalité, il faudrait tenir compte également des frais supplémentaires en poteaux et accessoires dûs à l'emploi de fils plus lourds.

» Dans le cas plus compliqué où les lignes à grande distance comportent des bobines Pupin et des relais téléphoniques, l'augmentation des dépenses par postes d'abonnés aurait été moindre, mais resterait probablement supérieure à 50 francs.

» La conclusion est, en tout cas, la même : *l'emploi d'appareils d'efficacité inférieure est toujours très onéreux.*

» Si, au contraire, on emploie des appareils dont l'efficacité à la transmission et à la réception est excellente, on peut réaliser des économies importantes sur les autres parties du réseau et notamment sur les lignes d'abonnés et sur les circuits interurbains, tout en assurant un service téléphonique satisfaisant au point de vue commercial.

» Les pertes dues aux appareils d'abonnés sont donc toujours une cause de dépenses qui pourrait être évitée et qui *doit être évitée*. (1).

» Mais il ne suffit pas que le type d'appareil d'abonné choisi ait une bonne efficacité, il faut encore que cette efficacité reste *constante*. Il est, en effet, impossible de certifier, à priori, qu'avec des lignes et des installations de bureaux dont les équivalents de transmission sont parfaitement déterminés et satisfaisants, il sera possible de faire communiquer commercialement deux abonnés quelconques si l'on n'est pas sûr à l'avance de disposer dans le microphone de l'abonné qui parle d'une puissance électrique suffisante et, dans le récepteur de l'abonné qui écoute, d'un rendement électromécanique suffisant.

» Il convient, par conséquent, non seulement que tous les appareils d'abonnés soient semblables entre eux, au point de vue de l'efficacité de transmission et de réception, lorsqu'ils sont placés dans des conditions géométriques et électriques déterminées et comparés à un appareil étalon déterminé (ce qui est le cas dans les essais d'efficacité et ce dont il est toujours possible de s'assurer, au service de la vérification du matériel, avant le poinçonnage des appareils), mais il faut aussi qu'un même appareil d'abonné garde une efficacité à peu près constante lorsqu'il est placé dans toutes les positions géométriques possibles que l'abonné est susceptible de lui donner (notamment en ce qui concerne l'orienta-

(1) Il ne faut pas pousser cette conclusion à l'extrême et songer, par exemple, à utiliser des amplificateurs chez les abonnés pour obtenir des postes d'une efficacité de transmission énormément accrue. En effet, les câblages des installations, des bureaux téléphoniques et les câbles de réseaux urbains qui contiennent les lignes d'abonnés ne sont pas parfaitement anti-inductés et l'utilisation de microphones de puissance excessive provoquerait des mélanges de conversation.

tion du microphone par rapport au plan vertical et la distance raisonnable du microphone à la bouche).

» Si un appareil d'abonné comporte des pièces amovibles et interchangeables et, en particulier, une capsule microphonique amovible, il faut que l'efficacité se conserve lorsqu'on remplace une de ces pièces interchangeables par une pièce analogue, prise au hasard dans un lot accepté.

» Enfin, dernière remarque concernant l'efficacité : parmi les deux composantes de l'efficacité totale d'un poste d'abonné, il y a lieu de considérer, comme plus importante que l'autre, l'efficacité à la transmission, car lorsque cette efficacité à la transmission est grande, les bruits provenant de la ligne sont relativement moins gênants. Par conséquent, de deux postes qui, toutes choses égales d'ailleurs, ont la même efficacité totale, il vaut mieux préférer celui qui a la plus grande efficacité à la transmission.

» Les conditions d'efficacité à la transmission et à la réception étant satisfaisantes, il faut s'assurer que d'autres conditions importantes le sont aussi.

» En premier lieu, il est nécessaire que le microphone ne brûle pas d'une manière appréciable. Un microphone très apte à brûler, non seulement cause un bruit de friture qui peut rendre toute conversation impossible, mais encore peut provoquer une fusion partielle du charbon du microphone lorsque l'appareil reste longtemps décroché, ce qui aboutit finalement à une rupture du circuit microphonique, d'où, dans les installations à batterie centrale, non seulement mise hors service du poste d'abonné, mais aussi troubles de fonctionnement au bureau central où la lampe d'appel reste toujours éteinte.

» Enfin, un poste téléphonique à micro-téléphone combiné, ne doit pas présenter une aptitude marquée à l'effet de Larsen.

» Lorsqu'un micro-téléphone est, en effet, près de la limite au-delà de laquelle un sifflement se produirait par amorçage d'oscillations entre le récepteur et le microphone, il donne certainement une transmission peu intelligible. D'autre part, comme l'efficacité des appareils entre en jeu dans le circuit des oscillations, les tendances aux sifflements d'un micro-téléphone limitent l'efficacité qu'il serait possible d'obtenir.

» Toutes ces considérations doivent entrer en jeu dans le choix ou l'admission, sur les réseaux, d'un type d'appareil téléphonique d'abonné. Les essais que je vous ai décrits et qui sont journellement effectués au Laboratoire d'Études et de Recherches techniques des Postes et Télégraphes, permettent de préciser, autant que possible, ces différents points.

» Je m'excuse d'avoir été un peu long dans leur description et je vous remercie vivement de l'attention patiente avec laquelle vous avez bien voulu suivre cette communication. »

DISCUSSION DE LA COMMUNICATION DE M. VALENSI.

M. Ravut développe des calculs qui l'amènent à conclure que les méthodes actuellement en usage, excellentes pour surveiller la fabrication d'un appareil donné, sont, pour des raisons diverses, sujettes à caution s'il s'agit de comparer des appareils de fabrications différentes.

M. RAVUT. — « A propos de la communication qui vient d'être faite, je voudrais vous dire quelques mots des difficultés auxquelles on se heurte dans l'interprétation des résultats des essais de téléphonométrie, tels qu'ils viennent de vous être décrits. Je m'excuse si les quelques remarques que j'ai à vous présenter ont un caractère un peu théorique, je m'efforcerai de limiter les calculs au minimum, mais il faut en faire quelques-uns cependant quand on examine ces questions complexes de propagation.

» Si l'on n'a en vue que l'étude des phénomènes qui accompa-

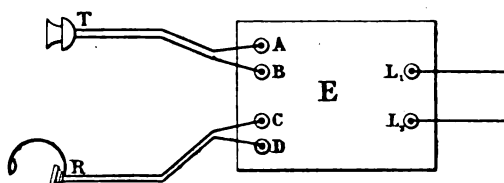


Fig. 1. — Schéma théorique d'un poste téléphonique.

gnent la circulation des courants téléphoniques, on peut raisonner comme il suit :

» Un poste téléphonique comprend essentiellement : 1° à l'intérieur d'une enveloppe quelconque, un réseau électrique E, dont le schéma peut varier d'un poste à l'autre, ainsi que les constantes des organes qui le constituent; 2° un transmetteur T, connecté au réseau E par deux bornes A et B; 3° un récepteur R, connecté au même réseau E par deux bornes C et D; 4° deux bornes L_1 et L_2 , convenablement rattachées au réseau E et auxquelles viendront s'attacher les deux fils de ligne.

» Appelons v et i la différence de potentiel et le courant aux bornes « ligne » L_1 et L_2 ; v_t et i_t , la différence de potentiel et le courant aux bornes « transmetteur » A B; v_r et i_r , la différence de potentiel et le courant aux bornes « récepteur » C et D.

» Si les sens positifs adoptés pour les courants en A, C et L_1 ,

sont convenables, on sait ⁽¹⁾ que l'intercalation du réseau E entre les trois paires de bornes AB, CD et L₁L₂ implique l'existence, entre les six quantités v, v_i, v_r, i, i_i, i_r , de trois relations linéaires de la forme

$$(1) \quad \begin{cases} v = a i + b i_i + c i_r, \\ v_i = b i + a_r i_i + f i_r, \\ v_r = c i + f i_i + a_r i_r. \end{cases}$$

» Les six impédances a, a_r, a_r, b, c, f sont déterminées par la contexture même du réseau E et des organes qui le constituent. Elles sont d'ailleurs fonction de la pulsation ω des courants alternatifs que l'on suppose circuler en régime stable dans le réseau. Enfin, ces six impédances sont directement mesurables pour un réseau E donné.

» Rappelons que, pour écrire les équations (1), on considère les

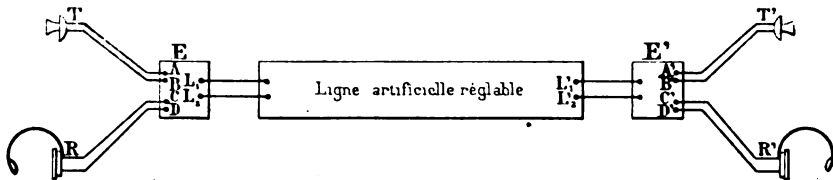


Fig. 2. — Schéma théorique de la liaison de deux postes téléphoniques par une ligne artificielle réglable.

potentiels et les courants alternatifs sous la forme exponentielle familière aux téléphonistes, par exemple $v = V e^{j\omega t}$, $i = I e^{j\omega t}$, les constantes V et I tenant compte des différences de phase.

» I. — CONDUITE DES ESSAIS. — Les dispositifs d'essai qui viennent de nous être minutieusement décrits se résument au schéma de la figure 2, quand on se place au seul point de vue de la propagation des courants téléphoniques, abstraction faite de tous les ingénieux systèmes de commutation et de signalisation introduits pour les raisons particulières indiquées par M. Valensi.

» Le poste à essayer (E T R, à gauche du schéma) est raccordé, par ses bornes de ligne L₁ L₂, à une ligne artificielle comportant en série une partie fixe et une partie réglable.

» Les deux bornes de sortie L_{1'} L_{2'} de cette ligne artificielle sont connectées aux bornes « ligne » d'un poste téléphonique étalon (E' T' R', à droite du schéma).

(1) C. RAVUT. *Revue générale de l'Electricité*, t. XIV, p. 17.

» Dans le cours des essais, on est amené à substituer au poste E T R un poste étalon de comparaison, qu'on peut supposer identique au poste E' T' R'.

» La ligne artificielle réglable intercalée, que l'on suppose symétrique, est caractérisée par une impédance caractéristique Z et un coefficient de transmission P_n , dont la valeur absolue P_n , dépend du nombre des commutateurs basculés, tandis que son argument φ reste, comme Z , invariable. La partie réelle de P_n , c'est-à-dire $P_n \cos \varphi$, n'est autre que le coefficient d'affaiblissement de la ligne artificielle en question pour la position considérée des commutateurs.

» Il va de soi que le poste E' T' R' donnera lieu à l'établissement d'équations analogues aux équations (1), savoir :

$$(2) \quad \left\{ \begin{array}{l} v' = a' i' + b' i_t + c' i_r, \\ v_t = b' i' + a_t i_t + f' i_r, \\ v_r = c' i' + f' i_t + a_r i_r. \end{array} \right.$$

Les impédances a' , b' , etc, qui figurent dans ces équations, peuvent naturellement différer profondément de leurs analogues des équations (1), lorsque les postes E T R et E' T' R' ne sont pas de la même fabrication.

» Ajoutons enfin que le transmetteur et le récepteur du poste E T R ont chacun une impédance particulière. Toutefois, il convient de distinguer, pour le transmetteur, l'impédance à vide (lorsque le transmetteur n'est pas excité par des ondes sonores), soit Z^o , et l'impédance en fonctionnement Z_t^f .

» Ces deux quantités peuvent différer assez notablement l'une de l'autre. Nous appellerons Z_r l'impédance du récepteur.

» Au poste E' T' R', nous appellerons Z_t^o , Z_t^f , Z_r , les quantités analogues. Là encore il peut y avoir de sérieuses différences entre les valeurs de Z_t^o et Z_t^f , de Z_t^f et Z_r^f , de Z_r et Z_r^f , si les postes E T R et E' T' R' ne sont pas de la même fabrication.

» II. — ESSAI D'EFFICACITÉ DE TRANSMISSION. — Dans cet essai, un opérateur O_1 parle devant le transmetteur T, un autre opérateur O_2 écoute au récepteur R'. Puis on substitue au poste à essayer E T R, un poste étalon E'' T'' R'' (à peu près identique au poste E' T' R'); l'opérateur O_1 parle devant T'' et le même opérateur O_2 que précédemment écoute encore en R'. On agit sur les commutateurs de la ligne artificielle jusqu'à ce que l'opéra-

teur O_2 ne constate plus de différence d'audition, quel que soit celui des postes devant lequel parle l'opérateur O_1 . On a alors basculé n_1 commutateurs pour le poste E T R; n'_1 , pour le poste E" T" R". L'un au moins de ces deux nombres est égal au minimum au-dessous duquel on ne veut pas descendre pour la composition de la ligne artificielle, l'autre lui est supérieur.

» Si on a $n_1 > n'_1$, le poste E T R est dit *meilleur* que l'étalon E" T" R". Si on a $n_1 < n'_1$, le poste E T R est dit *pire* que l'étalon. La différence $n_1 - n'_1$ ou $n'_1 - n_1$ est prise comme évaluation quantitative de cette amélioration ou de cette pèjoration.

» Il est intéressant de regarder d'un peu près les phénomènes qui se produisent au cours de l'essai, afin de se rendre un compte exact des difficultés en face desquelles on se trouve lorsqu'il s'agit d'interpréter les résultats. Ceux-ci sont en effet délicats à obtenir par eux-mêmes; M. Valensi vous a exposé quel luxe de précautions on doit prendre pour éviter les erreurs d'appréciation des opérateurs; il vous a dit que l'on devait procéder à de multiples essais, à des moyennes de résultats, etc. Il peut ne pas être inutile d'étudier, en se plaçant au point de vue strictement technique, les résultats obtenus au prix de toutes ces précautions expérimentales.

» Dans l'essai, on trouve interposés en série entre le transmetteur T et le récepteur R' : 1° le poste E T R (avec l'impédance Z_r du récepteur branchée entre les bornes C D); 2° la ligne artificielle; 3° le poste E' T' R' (avec le microphone T' au repos, branché entre les bornes A' B').

» Quand on remplace le poste à essayer E T R par le poste étalon E" T" R", on ne change rien autre à l'installation si ce n'est la valeur de l'affaiblissement de la ligne artificielle. Si, donc, on a égalité d'audition, c'est qu'on a compensé une infériorité du poste essayé par une diminution de l'affaiblissement de la ligne artificielle, d'où le principe de la mesure. Cette vue rapide est-elle confirmée par l'étude des phénomènes de propagation, lorsqu'il s'agit de comparer les uns aux autres des postes de fabrication très diverse?

» Portons notre attention sur l'essai du poste E T R.

» Le récepteur R étant en place, le potentiel v_r et le courant i_r , aux bornes du récepteur sont liés l'un à l'autre par une équation que nous écrirons

$$(3) \quad v_r = -Z_r i_r,$$

le signe moins tenant aux sens positifs choisis pour les potentiels et les courants.

» Si l'on tient compte de cette relation (3), il devient possible d'éliminer v_r et i_r entre les équations (1) et (3) et d'obtenir deux relations entre les potentiels v et v_t et les courants i et i_t , savoir :

$$(4) \quad \begin{cases} v = A_t i + B_t i_t, \\ v_t = B_t i + C_t i_t. \end{cases}$$

A_t, B_t, C_t ayant les valeurs

$$(5) \quad \begin{cases} A_t = a - \frac{c^2}{a_r + Z_r}, \\ B_t = b - \frac{cf}{a_r + Z_r}, \\ C_t = a_t - \frac{f^2}{a_r + Z_r}. \end{cases}$$

» Ces équations (4) caractérisent la transmission entre les bornes A B du transmetteur et les bornes L_1, L_2 de la ligne; C_t est différent de A_t parce que le système n'est pas symétrique.

» On met facilement les équations (4) sous la forme classique :

$$(6) \quad \begin{cases} v = (S_t \operatorname{Ch} P_t) v_t - (Y_t \operatorname{Sh} P_t) i_t, \\ -i = -\left(\frac{1}{Y_t} \operatorname{Sh} P_t\right) v_t + \left(\frac{1}{S_t} \operatorname{Ch} P_t\right) i_t, \end{cases}$$

S_t, Y_t, P_t , ayant les valeurs suivantes :

$$(7) \quad \begin{cases} (S_t)^2 = \frac{A_t}{C_t}, \\ (Y_t)^2 = A_t C_t - (B_t)^2, \\ \operatorname{Ch}^2 P_t = \frac{A_t C_t}{(B_t)^2}. \end{cases}$$

» On peut, en s'aidant des équations (5), expliciter les valeurs S_t, Y_t, P_t en fonction des impédances spécifiques a, a_t, a_r, b, c, f , du réseau E et de l'impédance Z_R du récepteur.

» A travers la ligne artificielle, la transmission est régie par des équations de la forme

$$(8) \quad \begin{cases} v' = v \operatorname{Ch} P_n + Z i \operatorname{Sh} P_n, \\ i' = -\frac{1}{Z} \operatorname{Sh} P_n - i \operatorname{Ch} P_n, \end{cases}$$

Z , désignant l'impédance caractéristique de la ligne artificielle (supposée symétrique) et P_n , un coefficient de transmission, qui

dépend du nombre n des commutateurs basculés. v' et i' désignent alors la différence de potentiel et le courant aux bornes « ligne » du poste d'écoute E' T' R'.

» Dans ce poste d'écoute, nous sommes amenés à envisager la transmission entre les bornes « ligne » et les bornes « récepteur », le transmetteur T' étant en place mais non excité.

» C'est dire qu'entre le potentiel v'_t et le courant i'_t , des équations (2), nous avons la relation supplémentaire :

$$(9) \quad v'_t = - (Z_t^s)' i'_t$$

le signe moins tenant, comme plus haut, aux sens positifs choisis pour les courants et les potentiels pour écrire les équations (2).

» On éliminera alors v'_t et i'_t entre les équations (2) et (9) et on obtiendra, entre v', i', v'_r, i'_r , les relations :

$$(10) \quad \begin{cases} v' = A'_r i' + B'_r i'_r, \\ v'_r = B'_r i' + C'_r i'_r, \end{cases}$$

que l'on mettra sous la forme

$$(11) \quad \begin{cases} v' = \left(\frac{1}{S_r} \text{Ch } P_r \right) v'_r - (Y'_r \text{Sh } P'_r) i'_r, \\ -i'_r = - \left(\frac{1}{Z_t} \text{Sh } P'_r \right) v' + (S'_r \text{Ch } P'_r) i', \end{cases}$$

avec

$$(12) \quad \begin{cases} (S'_r)^2 = \frac{A'_r}{C'_r}, \\ (Y'_r)^2 = A'_r C'_r - (B'_r)^2, \\ \text{Ch}^2 P_r = \frac{A'_r C'_r}{(B'_r)^2}, \end{cases}$$

$$(13) \quad \begin{cases} A'_r = a' - \frac{v'^2}{a'_t + Z_t^s}, \\ B'_r = c' - \frac{v' f'}{a'_t + Z_t^s}, \\ C'_r = a'_r - \frac{f'^2}{a'_t + Z_t^s}. \end{cases}$$

« L'élimination des potentiels et courants intermédiaires v, i, v', i' , entre les équations (6), (8) et (11), conduit à deux relations entre les potentiels et courants terminaux v_t, i_t et v_r, i_r , que l'on met sous la forme :

$$(14) \quad \begin{cases} v_r = (S_t \text{Ch } P_t) v_t - (Z_t \text{Sh } P_t) i_t, \\ -i_r = - \left(\frac{1}{Z_t} \text{Sh } P_t \right) v_t + \left(\frac{1}{S_t} \text{Ch } P_t \right) i_t. \end{cases}$$

» Le calcul des quantités S_i , Z_i et P_i est assez long, mais ne présente aucune difficulté. On les exprime en fonction des caractéristiques S_i , Y_i , P_i , des caractéristiques du poste en essai, S_r , Y_r , P_r , du poste de comparaison et des caractéristiques Z et P_n de la ligne artificielle.

» On a en particulier pour P_i , la formule suivante :

$$(15) \quad \text{Ch}^2 P_i = \alpha + \beta + \gamma + \delta + \left\{ \lambda + \tau \left(\frac{Y_i S_i}{Z} - \frac{Z}{Y_i S_i} \right) + \right. \\ \left. \left\{ \nu + \rho \left(\frac{Y_r S_r}{Z} - \frac{Z}{Y_r S_r} \right) + \mu \left(\frac{Y_r S_r}{Y_i S_i} - \frac{Y_r S_r}{Y_i S_i} \right) + \sigma \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{Y_i S_i Y_r S_r}{Z^2} - \frac{Z^2}{Y_i S_i Y_r S_r} \right) \right\} \right\}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \mu$, etc, désignant les divers termes du développement de

$$\text{Ch}^2 (P_i + P_n + P_r),$$

savoir :

$$(16) \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \text{Ch}^2 P_i \text{Ch}^2 P_n \text{Ch}^2 P_r, \\ \beta = \text{Sh}^2 P_i \text{Sh}^2 P_n \text{Ch}^2 P_r, \\ \gamma = \text{Sh}^2 P_i \text{Ch}^2 P_n \text{Sh}^2 P_r, \\ \delta = \text{Ch}^2 P_i \text{Sh}^2 P_n \text{Sh}^2 P_r, \\ \lambda = \text{Ch} P_i \text{Sh} P_i \text{Ch} P_n \text{Sh} P_n \text{Ch}^2 P_r, \\ \mu = \text{Ch} P_i \text{Sh} P_i \text{Ch} P_n \text{Ch} P_r \text{Sh} P_r, \\ \nu = \text{Ch}^2 P_i \text{Ch} P_n \text{Sh} P_n \text{Ch} P_r \text{Sh} P_r, \\ \rho = \text{Sh}^2 P_i \text{Ch} P_n \text{Sh} P_n \text{Ch} P_r \text{Sh} P_r, \\ \sigma = \text{Ch} P_i \text{Sh} P_i \text{Sh}^2 P_n \text{Ch} P_r \text{Sh} P_r, \\ \tau = \text{Ch} P_i \text{Sh} P_i \text{Ch} P_n \text{Sh} P_n \text{Sh} P_r, \end{array} \right.$$

de sorte que

$$(17) \quad \text{Ch}^2 (P_i + P_n + P_r) = \alpha + \beta + \gamma + \delta + \\ Z (\lambda + \mu + \nu + \rho + \sigma + \tau).$$

» La formule générale (15) montre que P_i est une fonction compliquée de :

» 1° les trois coefficients de transmission : P_i entre le microphone et l'entrée de la ligne artificielle; P_n , à travers la ligne artificielle (n commutateurs basculés); P_r , entre la sortie de la ligne artificielle et le récepteur du poste d'écoute;

» 2° l'impédance $Y_i S_i$, impédance caractéristique apparente du poste essayé considéré dans ses rapports entre le transmetteur et la ligne et mesurée du côté de la ligne; l'impédance Z , impédance caractéristique de la ligne artificielle, supposée homogène et symétrique; l'impédance $Y_r S_r$, qui est l'impédance caractéristique

tique apparente du poste d'écoute considéré dans ses rapports entre la ligne et le récepteur, mesurée du côté de la ligne. On vérifie les interprétations données à Y_i , S_i et Y'_r , S'_r , en remontant aux équations (6) et (11) et se rappelant que l'impédance caractéristique apparente est la moyenne géométrique entre les impédances mesurées à l'extrémité considérée, l'autre étant successivement ouverte et court-circuitée.

» On voit immédiatement, sur la formule (15), que l'on n'a pas en général

$$(18) \quad P_i = P_l + P_n + P'_r,$$

et que cette égalité n'est vérifiée que si

$$(19) \quad Y_i, S_i = Z = Y'_r, S'_r,$$

c'est-à-dire si les impédances caractéristiques apparentes qui se font face en chaque point de raccordement sont égales.

» Lorsqu'on fait l'essai comparatif en remplaçant le poste E T R par un poste étalon, identique, par exemple, au poste E'T'R', le nombre de commutateurs basculés sur la ligne artificielle étant n , la transmission entre le microphone du poste de comparaison et le récepteur du poste d'écoute est régie par des équations analogues aux équations (14), savoir :

$$(20) \quad \begin{cases} v'_r = (S'_1 \operatorname{Ch} P'_1) v'_i - (Z'_1 \operatorname{Sh} P'_1) i'_i, \\ -i'_r = -\left(\frac{1}{Z'_1} \operatorname{Sh} P'_1\right) v'_i + \left(\frac{1}{S'_1} \operatorname{Ch} P'_1\right) i'_i, \end{cases}$$

les quantités S'_1 , Z'_1 , P'_1 , étant définies cette fois en fonction des constantes Y'_i , S'_i , P'_i , qui caractérisent le poste étalon fonctionnant en transmetteur, les constantes Y'_r , S'_r , P'_r , qui caractérisent le même poste fonctionnant en récepteur, et les caractéristiques Z et P_n de la ligne artificielle.

» Or, qu'est-ce qui différencie les résultats d'audition dans les deux essais? C'est : 1° la différence d'efficacité possible des deux générateurs, c'est-à-dire la différence de leur rendement électromécanique lorsqu'on parle devant chacun d'eux; 2° la valeur de l'affaiblissement du circuit interposé, c'est-à-dire la partie réelle de P_1 et la partie réelle de P'_1 .

» Supposons d'abord que le microphone du poste en essai ait même rendement électromécanique que le poste étalon. Si l'équation (18) était vérifiée lors de l'essai du poste E T R et vérifiée

aussi lors de l'essai comparatif avec le poste étalon, on aurait

$$\begin{aligned} P_1 &= P_t + P_n + P'_r, \\ P'_1 &= P'_t + P'_n + P'_r, \end{aligned}$$

donc,

$$P_1 - P'_1 = P_t - P'_t + P_n - P'_n.$$

» Au moment de l'équilibre d'audition, les microphones étant supposés avoir le même rendement électromagnétique, on aurait $P_1 = P'_1$ et il en résulterait

$$P_n - P'_n = P'_t - P_t,$$

c'est-à-dire qu'à $n > n'$ correspondrait $P_n > P'_n$ et $P_t < P'_t$. La différence des affaiblissements propres des postes serait égale et de signe contraire à la différence d'affaiblissement des lignes artificielles, la différence du nombre de miles de câble étalon débouché dans les deux cas donnerait donc bien une mesure correcte de la différence d'affaiblissement propre du poste E T R et du poste étalon, la méthode serait inattaquable.

» On peut admettre que, si les microphones n'ont pas le même rendement électromécanique, mais si les conditions

$$(21) \quad Y_t S_t = Y'_t S'_t = Y'_r S'_r = Z.$$

sont satisfaites, la lecture de la différence des nombres de miles de câble étalon débouché dans les deux essais donnera une évaluation empirique correcte de la différence d'efficacité du poste E T R et du poste étalon, le vocable efficacité groupant, en un bloc difficile à analyser : 1° le rendement électromécanique de chaque transmetteur; 2° l'affaiblissement propre P_t ou P'_t , du poste fonctionnant en transmetteur.

» Mais tout cela n'est plus aussi simple si les conditions (21) ne sont pas remplies.

» Or, ces conditions (21) se divisent en deux groupes :

$$1^\circ \quad (22) \quad Y_t S_t = Y'_t S'_t = Y'_r S'_r = Z,$$

$$2^\circ \quad (23) \quad Y_t S_t = Z.$$

» Les deux premières conditions ne concernent que les rapports entre la ligne artificielle de mesure et le poste étalon fonctionnant soit en récepteur, soit en transmetteur. Ces conditions sont-elles remplies? Peut-être, si le poste satisfait à la condition $Y_t S'_t = Y'_t S'_r$, qui lui est particulière et si la ligne artificielle est spécifiée en conséquence. Encore y a-t-il lieu de s'en assurer.

» Quant à la seconde, elle ne sera satisfaite que si le poste E T R

a été étudié spécialement en vue de fonctionner sur la ligne artificielle du poste d'essai, et nous verrons tout à l'heure à quoi cela conduit.

» Si les conditions (22) sont satisfaites par le poste étalon vis-à-vis de la ligne artificielle, on a bien

$$P_1 = P_t + P_n + P_r,$$

mais il est manifeste que le poste étalon se trouve dans une situation privilégiée en vue de l'essai puisque, pour lui, toutes les pertes par réflexion aux points de raccordement sont annulées.

» Mais si ces conditions ne sont pas satisfaites, c'est-à-dire si le poste étalon de comparaison n'est pas mis dans cette situation privilégiée, la non égalité de Y_t, S_t , et de Z , par exemple, va, d'après l'équation (15), avoir un retentissement sur la valeur de P_1 lors de l'essai du poste E T R et cela dans des conditions d'ailleurs fort complexes, puisqu'aux effets qui en résultent se combinent ceux résultant de la non égalité éventuelle simultanée de Y_t, S_t et de Z .

» Au moment de l'égalité d'audition, on aura bien encore $P_1 = P'_1$ et c'est tout ce que l'on peut affirmer, mais comme on n'aura pas par ailleurs

$$P_1 = P_t + P_n + P_r,$$

$$P'_1 = P'_t + P'_n + P'_r,$$

la différence $P_n - P'_n$, c'est-à-dire le nombre de miles de câble standard débouché en plus dans l'un ou l'autre des essais, ne mesurera plus $P_t - P'_t$.

» III. — ESSAIS A LA RÉCEPTION. — Une analyse identique à celle qui vient d'être faite conduit, dans ce cas, à faire dépendre la valeur de la méthode des conditions

$$Y_t S_r = Y'_t S'_r = Z,$$

et toutes les conclusions qui précèdent subsistent avec la seule modification des indices.

» En résumé, on voit donc que les transmetteurs T et T', équivalents au point de vue électromécanique, et des récepteurs R et R', équivalents au point de vue électromécanique, placés : T et R, sur le poste C; T' et R', sur le poste E', ne donneront $P_n = P'_n$ aux essais que si

$$Y_t S_t = Y'_t S'_t \quad \text{et} \quad Y_r S_r = Y'_r S'_r,$$

et les différences d'efficacité ne seront réellement mesurées par le

nombre de miles de câble standard débouché dans les deux essais que si

$$Y_l S_l = Y'_l S'_l = Z = Y_r S_r = Y'_r S'_r.$$

» La méthode sera donc parfaite si l'on compare des postes de même fabrication qui doivent comporter, par définition, des transmetteurs équivalents et des récepteurs équivalents, et dont les réseaux intérieurs doivent évidemment satisfaire aux conditions $Y_l S_l = \text{constante}$, $Y_r S_r = \text{constante}$.

» L'interprétation des résultats des mesures sera beaucoup plus aléatoire si l'on compare à un poste étalon des postes de fabrication différente.

» Qui plus est, si la ligne artificielle de mesure et les postes étalons ont été construits de façon à satisfaire aux conditions

$$Y'_l S'_l = Y'_r S'_r = Z,$$

ce qui est normal si l'installation d'essai est réalisée par un fabricant de postes téléphoniques, en vue de suivre, par les mesures d'efficacité en question, la régularité de sa fabrication, on peut affirmer que tout poste E T R soumis aux essais se trouvera systématiquement en état d'infériorité, à moins qu'il n'ait été construit spécialement pour s'adapter à la ligne artificielle de mesure, c'est-à-dire pour satisfaire aux conditions

$$Y_l S_l = Y_r S_r = Z.$$

» S'il n'en est pas ainsi, le poste E T R ne pourra paraître équivalent au poste étalon que si, en fait, son transmetteur et son récepteur ont un meilleur rendement électromécanique que ceux du poste étalon, à égalité d'affaiblissement intérieur dans les deux postes.

» IV. — ESSAIS DE NETTETÉ. — Tout ce qui vient d'être dit à propos des essais d'efficacité subsiste intégralement mais, comme l'analyse précédente suppose choisie une pulsation de courant alternatif pour la conduite des calculs, on arrive à cette conclusion que l'appareil essayé ne pourra paraître aussi net que le poste étalon, tant à la réception qu'à la transmission, que si les conditions

$$Y_l S_l = Y'_l S'_l \quad \text{et} \quad Y_n S_n = Y'_n S'_n$$

sont satisfaites pour toutes les pulsations du registre téléphonique.

» V. — MESURE D'EFFET LOCAL. — Dans cette mesure, vu les équations (4), il est indispensable de spécifier sur quelle impé-

dance Z on boucle les bornes lignes L_1, L_2 du poste E T R. En effet, la mesure de l'effet local découle des équations (1).

» Supposons les bornes « ligne » fermées sur une impédance Z . Nous devons, aux équations (1), adjoindre l'équation supplémentaire

$$(26) \quad v = -Z i$$

le signe moins s'expliquant toujours dans les sens positifs choisis.

» On élimine alors v et i entre les équations (1) et (26) et on obtient deux équations de la forme

$$(27) \quad \begin{cases} v_l = A_l i_l + B_l i_r, \\ v_r = B_l i_l + C_l i_r, \end{cases}$$

qui caractérisent le fonctionnement en local.

» Or, lorsque le poste E T R fonctionne en poste transmetteur, on raccorde à ses bornes une ligne dont l'impédance caractéristique a une valeur Z et, si l'affaiblissement de cette ligne est suffisamment élevé, c'est cette impédance caractéristique Z elle-même qu'on doit introduire dans l'équation (26), les caractéristiques de la transmission (27) dépendent alors de cette valeur Z .

» De tout ceci, il résulte qu'un constructeur désireux de réaliser un poste capable de subir, avec le maximum de chances de succès, les essais d'efficacité et de netteté et de donner de bons résultats dans les mesures de l'effet local, peut se préoccuper de réaliser un poste adapté à la ligne artificielle qui servira à faire les mesures, satisfaisant en particulier aussi étroitement que possible aux conditions

$$Y_l S_l = Y_r S_r = Z$$

dans tout le registre téléphonique.

» Ce nouvel aspect de la question pose alors la question de l'identité entre les caractéristiques de la ligne artificielle de mesure et celles des lignes réelles sur lesquelles les postes sont appelés à fonctionner. Or, si les caractéristiques de la ligne artificielle sont à peu près celles des câbles souterrains qui, dans les grandes villes, relient les abonnés à leurs centraux respectifs, elles diffèrent très sérieusement des caractéristiques soit des lignes aériennes, encore nombreuses dans le réseau français, soit des câbles pupinisés dont l'usage tend à se répandre.

» A quoi cela conduira-t-il si, pour augmenter une efficacité apparente sur la ligne artificielle de mesure, on risque de donner aux éléments constitutifs du réseau E des constantes électriques

telles que les effets de réflexion, nuls dans le cas de l'essai sur ligne artificielle, augmentent rapidement lorsque le poste sera raccordé à des lignes aériennes ou à des lignes pupinisées?

» En d'autres termes, si l'on traduit cela en graphique (fig. 3), portant en abscisses les valeurs absolues des impédances caractéristiques des lignes et, en ordonnées, les efficacités moyennes (moyenne entre l'efficacité à la réception et l'efficacité à la transmission) ne peut-on pas être conduit au résultat suivant :

» Appelons Z_a l'impédance d'une ligne aérienne; Z_s , celle du câble standard; Z_p , celle d'une ligne pupinisée. On aura généralement $Z_a < Z_s < Z_p$.

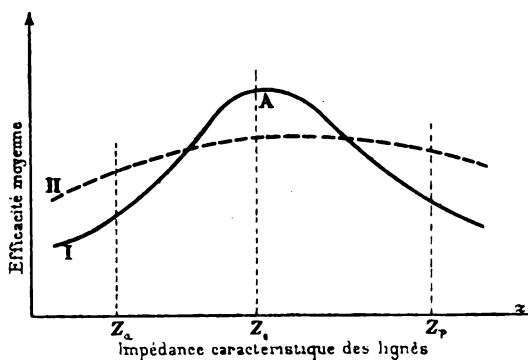


Fig. 3. — Graphique montrant les variations de l'efficacité moyenne de deux postes I et II en fonction de l'impédance caractéristique de la ligne sur laquelle il est branché.

Z_a , impédance d'une ligne aérienne;
 Z_s , — du câble standard;
 Z_p , — d'une ligne pupinisée.

» Dès lors, un appareil dont la courbe d'efficacité sera telle que I, avec une pointe pour la valeur Z_s , sera admis sur le réseau, tandis qu'un appareil dont la courbe d'efficacité sera telle que II sera refusé, A représentant l'efficacité du poste étalon essayé sur la ligne artificielle de mesure.

» Pourtant il est évident que, sur un réseau aussi dépourvu d'uniformité que le réseau français actuel, le poste II, d'efficacité plus uniforme, pourrait être d'un usage plus général.

» Sans vouloir entrer dans des détails de construction, je puis cependant signaler les résultats suivants : ayant mis en essai sur une ligne artificielle et avec un poste étalon de comparaison donné, un certain poste téléphonique, nous sommes arrivés, sans changer quoi que ce soit au transmetteur ou au récepteur dudit

poste, mais simplement en faisant varier entre des limites très resserrées les caractéristiques de la bobine d'induction, c'est-à-dire l'accouplement du poste avec la ligne, à faire varier dans des proportions considérables la valeur apparente de l'efficacité à la transmission et de l'efficacité à la réception, l'une variant en sens inverse de l'autre, mais sans que la moyenne reste pour cela constante. Les courbes de variation avaient l'allure de celles indiquées sur la figure 4.

» Naturellement, il y a pour la courbe moyenne III un maximum, mais il dépend de la caractéristique de la ligne artificielle d'essai et varie avec elle.

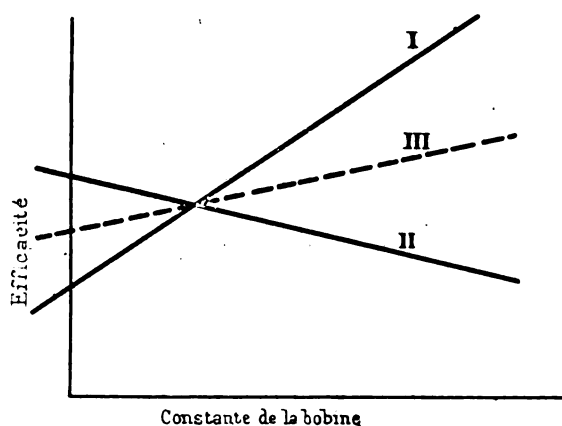


Fig. 4. — Courbe des variations de l'efficacité d'un poste à la transmission (I) et à la réception (II) et leur valeur moyenne (III), en fonction des constantes caractéristiques de la bobine accouplant ce poste à la ligne.

» La conclusion de tout ceci est qu'il semble nécessaire d'agir avec beaucoup de circonspection dans l'interprétation des résultats bruts des mesures téléphonométriques conduites avec une ligne artificielle et des postes étalons donnés. Rien n'est plus judicieux s'il s'agit de surveiller la régularité d'une fabrication donnée, car alors les postes à essayer sont de même fabrication que le poste étalon. Mais lorsque les postes à essayer sont de fabrications diverses, la question est infiniment plus complexe et le résultat brut des mesures apparaît beaucoup moins caractéristique.

» Il est incontestable que les nécessités de la téléphonie moderne rendent indispensable la mise au point de méthodes d'essai

qui permettent de ne mettre en service que des appareils offrant le maximum de garantie tant au point de vue de l'efficacité à la transmission et à la réception, qu'au point de vue de la durée. C'est d'ailleurs là la condition même du progrès dans le domaine des applications de la téléphonie, qui se développe de jour en jour davantage. Mais je crois, comme l'a fait remarquer M. Valensi, que les méthodes de téléphonométrie actuelles ne constituent qu'une ébauche de ce que devront être dans l'avenir les méthodes modernes d'essai en téléphonie. Il serait heureux que l'attention des chercheurs se portât sur ces questions complexes afin d'amener, par une collaboration des bonnes volontés efficaces, la mise au point prochaine de méthodes qu'on puisse qualifier de définitives. »

M. JANET exprime son étonnement de voir employer par l'Administration française des Postes, Télégraphes et Téléphones une unité de mesure qui n'a pas de place parmi les unités légales.

M. COURTOIS demande si les essais effectués par l'Administration indiquent que certains appareils à la transmission ou à la réception ont une efficacité supérieure à celle de l'étalon.

M. L. CAHEN. — « Je m'associe aux réserves de M. Ravut, relativement à l'emploi du câble étalon. Tout d'abord, je trouve regrettable que l'on fasse usage du terme « mile », unité étrangère, alors que sur presque tout le continent le kilomètre est employé. C'est peut-être une querelle de mots; mais en fait, il s'agit d'une boîte d'impédance : si chaque élément représente un mile d'un certain type de câble, il pourrait aussi bien représenter un kilomètre d'un autre type; pourquoi, dans ces conditions, si l'on tient absolument à avoir la même unité que les Anglo-Saxons, ne pas dire unité ou section de câble étalon?

» Mais, d'ailleurs, il faut remarquer que ce fameux câble étalon est un singulier étalon; car les Anglais choisissent une certaine capacité qui donne finalement pour chaque mile un coefficient d'affaiblissement de 0,106, tandis que les Américains ont adopté une autre valeur de capacité, donnant un coefficient de 0,109. La conférence internationale de 1923 a, il est vrai, adopté le mile anglais. Mais puisqu'il ne s'agit pas d'une unité d'usage général, pourquoi n'en pas choisir une plus logique, par exemple, une ligne de même nature, mais divisée en sections d'affai-

blissement 0,1? La correspondance avec les mesures anglaises ou américaines sera facile à faire, et on aura un étalon indépendant des unités des différents pays.

» L'emploi du mile anglais comme étalon de comparaison est encore plus fâcheux si on veut l'imposer pour le calcul des équivalents de transmission pour les circuits. Car toutes les formules permettant de prédéterminer les caractéristiques d'un câble conduisent au coefficient d'affaiblissement kilométrique et la nécessité de multiplier ce coefficient par 0,106, pour le traduire en cette unité empirique qu'est le mile, complique sans ajouter quoi que ce soit d'utile.

» D'autre part, le câble étalon a la caractéristique d'un câble ordinaire sans self-induction. Dans les mesures d'efficacité dont a parlé M. Valensi, on utilise 30 miles de ce câble, c'est-à-dire une longueur correspondant à la portée maximum des lignes. Or, le type de câbles sans self-induction est justement le seul qui ne serve jamais pour les longues lignes, car on sait que ces câbles ont un affaiblissement kilométrique très élevé, que rend plus gênant encore une distorsion très prononcée. On se sert, pour les longues lignes, soit de fils aériens nus, soit de câbles pupinisés qui ont, tous deux, tout au moins pour une longue gamme de fréquences, une distorsion très faible et une impédance caractéristique supérieure à celle du câble étalon.

» Comme conclusion, je pense qu'il serait bon de faire, de temps en temps, sur quelques appareils, des essais comparatifs en substituant au câble étalon une boîte d'affaiblissement sans distorsion et de voir si les résultats sont bien semblables.

» La question d'impédance caractéristique est peu importante ici, car je suis d'accord avec M. Valensi pour reconnaître que les sections en câble ordinaire placées près des appareils d'abonnés ont, dans la valeur de l'impédance résultante vue de cet appareil et malgré leur faible longueur, un effet prépondérant ; d'ailleurs, cette impédance varie énormément suivant la longueur de ces câbles ; j'en ai donné quelques exemples dans mes articles de *La Lumière électrique* de 1914. Dans ces conditions, on est forcé de prendre une valeur moyenne et le câble étalon à ce point de vue n'est pas mal choisi.

» Mais il n'en est pas de même en ce qui concerne la distorsion, car là c'est la ligne longue qui joue le rôle principal et la ligne complexe, comprenant quelques kilomètres de câble et une lon-

gue ligne aérienne ou pupinisée, se rapprochera beaucoup plus, à ce point de vue, de cette dernière que du câble. Le timbre de la voix transmise sera donc beaucoup plus altéré, toutes choses égales d'ailleurs, sur le câble étalon qu'en réalité. On peut se demander s'il n'en résultera pas des différences sur le classement des appareils, non seulement au point de vue netteté, mais même au point de vue efficacité. Il est à remarquer qu'il est très difficile de faire des essais d'audition comparée entre deux lignes donnant une distorsion différente; c'est, pour reprendre la comparaison photométrique de M. Valensi, comme si l'on comparait l'intensité d'une radiation rouge et d'une violette. J'ai récemment fait des comparaisons entre deux longues lignes, munies des mêmes relais et constituées l'une par un câble étalon, l'autre par un câble réel pupinisé : le timbre assourdi de la première était si différent du timbre clair de la seconde qu'on n'aurait pu établir la comparaison à moins de 4 ou 5 miles près.

» En somme, la méthode la plus exacte me paraîtrait consister à placer quelques miles de câble étalon aux deux extrémités — partie variable de la ligne — et de constituer la longue ligne par des résistances ohmiques. C'est d'ailleurs, je crois, ce qui se fait en Amérique.

» Ces réserves relatives au câble étalon ne sont nullement, dans mon esprit, une critique contre l'ensemble des méthodes de téléphonométrie, dont je reconnais la nécessité, et si je dois en signaler les difficultés et les imperfections, presque fatales, je n'en suis que plus disposé à convenir qu'il faut néanmoins faire quelque chose et que les procédés actuels constituent une amélioration énorme par rapport aux essais grossiers d'autrefois.

» D'autre part, je voudrais poser quelques questions à M. Valensi.

» 1° Si le câble étalon a des défauts, au moins est-il toujours le même. Par contre, le microphone étalon, si bon soit-il, n'a pas une constance absolue. Ne cherche-t-on pas à établir un étalon absolu par exemple au moyen d'un téléphone ou d'un amplificateur?

» 2° J'ai fait au cours de ma carrière, de très nombreux essais d'auditions comparées et j'ai été frappé de la difficulté d'aboutir à une grande précision. M. Valensi pourrait-il nous dire à com-

bien de miles monte l'écart maximum entre les résultats de deux équipes d'opérateurs exercés ? »

M. VALENSI. — « Je m'empresse d'abord de calmer les inquiétudes de MM. Janet, Cahen et Ravut au sujet du choix du mile de câble étalon comme unité de transmission, en leur disant que c'est une unité provisoire, adoptée par le Comité technique international préliminaire de Téléphonie à grande distance en Europe, lors de sa réunion préparatoire, en mars 1923, à Paris, mais simplement en attendant que, l'an prochain, la Conférence internationale plénière détermine une unité définitive. Le mile de câble étalon est en fait l'unité dans laquelle sont exprimés actuellement la plupart des résultats des mesures de transmission téléphonique qui ont été effectuées jusqu'à ce jour en Angleterre, aux Etats-Unis, en France et dans de nombreux pays à grand développement téléphonique.

» Mais tout le monde est d'accord sur les critiques que soulève cette unité conventionnelle : d'abord, il existe de petites différences entre l'unité utilisée, par exemple, aux Etats-Unis et celle utilisée en Europe; d'autre part, cette unité n'appartient pas au système métrique et décimal, de sorte qu'elle complique un peu les calculs; en troisième lieu, le câble étalon affaiblit les différentes fréquences de la voix dans des proportions différentes et introduit, par suite, une légère distorsion. Toutefois, il ne faut pas exagérer l'importance de ce point : en réalité, la déformation introduite par le câble étalon est comparable à celle de bien des liaisons téléphoniques couramment utilisées dans l'exploitation commerciale actuelle, de sorte que le câble étalon convient assez bien aux mesures effectuées par les méthodes de conversation.

» Je m'étonne, à ce point de vue, que M. Cahen n'ait pu établir, dans les mesures qu'il a effectuées avec deux longues lignes constituées l'une par un câble étalon, l'autre par un câble réel pupinisé, l'équilibre d'audition à moins de 4 ou 5 miles près. Peut-être les bobines Pupin introduisaient-elles dans le câble pupinisé, notamment à cause de la variation de leur résistance effective en fonction de la fréquence, une déformation supplémentaire importante, de sorte que M. Cahen avait à faire à deux lignes de timbres radicalement différents. Le Laboratoire d'Etudes techniques des Postes et Télégraphes a procédé bien souvent,

comme le recommande M. Cahen, à des mesures de transmission à travers une ligne artificielle fixe sans déformation, constituée par un ensemble de résistances non inductives (représentant, par exemple, une ligne aérienne d'affaiblissement total 2,5), encadrée par deux petites sections de câble artificiel, l'une de 2 miles de câble étalon et l'autre de 3 miles de câble étalon, concurremment avec des mesures de transmission effectuées sur le circuit standard (qui comporte, comme ligne fixe, 30 miles de câble étalon). Or, les résultats ont été toujours très voisins; l'écart constaté n'a jamais dépassé 3 miles de câble étalon. Voici, entre autres et pris au hasard, les résultats de mesures d'efficacité effectuées dans ces conditions avec des appareils différents de l'appareil étalon et différents l'un de l'autre :

» 1° Efficacité d'un poste à batterie centrale dont l'impédance à la pulsation 5 000 est 580 ohms | 96° 34' :

	Efficacité à la transmission :	Efficacité à la réception :
Mesurée sur le circuit standard.....	6.7 m. c. s., meilleur	2.7 m. c. s., meilleur
Mesurée au moyen d'une ligne artificielle sans déformation encadrée par 2 et 3 miles de câble standard (m. c. s.).....	4.3 m. c. s., meilleur	2.1 m. c. s., meilleur

» 2° Efficacité d'un poste à batterie centrale dont l'impédance à la pulsation 5 000 est 409 ohms | 54° 28' :

	Efficacité à la transmission :	Efficacité à la réception :
Mesurée sur le circuit standard....	4.9 m. c. s., meilleur	1.4 m. c. s., meilleur
Mesurée au moyen d'une ligne artificielle sans déformation encadrée par 2 et 3 miles de câble standard (m. c. s.).....	3 m. c. s., meilleur	0.8 m. c. s., meilleur

» Ces écarts sembleront très faibles si l'on remarque qu'en général les mesures d'efficacité sont faites à 0,5 m.c.s. près et que, dans certains cas, notamment dans les essais effectués avec des appareils à microtéléphones combinés avec capsules microphoniques interchangeables, les moyennes des résultats des mesures effectuées avec des équipes différentes d'opérateurs présentent un écart pouvant atteindre 1 mile de câble étalon, bien qu'on ait affaire à des opérateurs exercés et que toutes les pré-

cautions soient prises pour supprimer les « effets d'équation personnelle ».

» Ces précisions étant données (pour répondre notamment à l'une des objections et à une des questions de M. Cahen), je répète que tout le monde est d'accord sur les imperfections du mile de câble étalon et que les techniciens du téléphone le considèrent comme une unité provisoire.

» Par contre, une unité rationnelle qui, on doit l'espérer, pourra rallier tous les suffrages à la prochaine conférence plénière, peut être définie ainsi : l'unité de transmission est telle que les puissances à l'entrée et à la sortie d'un élément de ligne artificielle uniforme équivalent à une unité de transmission, soient entre elles dans le rapport $10^{0,1}$ (la puissance étant ici définie comme le produit du courant maximum par la tension maximum, c'est-à-dire le produit « volt-ampère » qui groupe la puissance active et la puissance réactive).

» Cette unité de transmission se prête fort bien aux calculs logarithmiques qui se présentent fréquemment dans les problèmes de la transmission téléphonique. Elle est définie par un rapport de puissances, ce qui est rationnel étant donné que les téléphonistes ont toujours à créer, convertir ou transmettre de l'énergie. Enfin, elle est d'une grandeur très commode dans la pratique (du même ordre de grandeur que l'affaiblissement 0,106 d'un mile de câble étalon).

» Naturellement, le choix d'une unité de transmission est lié à la détermination d'un circuit standard et il appartiendra au prochain Congrès international d'étudier comment doit être réalisée la ligne artificielle graduée en nouvelles unités de transmission.

» A ce sujet, je reconnais que, aux méthodes téléphonométriques actuelles, dont il faut bien se contenter pour le moment et qui (il faut en convenir) ont permis et permettent journellement de procéder à des essais dont l'importance pratique est considérable, en caractérisant d'une manière indiscutable les appareils par trop défectueux et inutilisables dans la pratique, il serait désirable de substituer des méthodes de mesures électriques effectuées avec des sources de courant alternatif étalonnées et des appareils de mesures électriques : électromètres, galvano-

mètres, etc... L'installation de mesures ou circuit standard, établie suivant ces données, comprendrait : 1° un dispositif transmetteur, constitué par un générateur de courant alternatif de forme d'onde appropriée, débitant dans un récepteur téléphonique calibré dont les ondes sonores impressionneraient, d'une manière bien déterminée et toujours la même, le microphone du poste essayé, de telle manière que les ondes électriques émises par ce poste et lancées sur la ligne étalon transportent une quantité d'énergie comparable à celle que fournit un appareil d'abonné dans les conditions de fonctionnement normal ; 2° une ligne artificielle sans déformation, de longueur réglable et calibrée en unités de transmission ; 3° un dispositif récepteur, dont le rendement en énergie serait le même pour toutes les fréquences du courant de mesure et serait comparable à l'efficacité, à la réception, d'un appareil d'abonné dans les conditions normales de fonctionnement, ce dispositif récepteur comportant des appareils de mesures très précis et très sensibles, capables d'apprécier un courant alternatif variant entre un milliampère et un microampère.

» La réalisation d'une telle installation se heurte à de grandes difficultés qui, pour le moment, n'ont pas encore été toutes vaincues. D'abord, on ne connaît pas suffisamment la forme du courant téléphonique pour pouvoir affirmer que telle combinaison déterminée de courants alternatifs sinusoïdaux de pulsations et d'amplitudes relatives convenablement choisies est rigoureusement équivalente à la voix humaine. Des études intéressantes sont entreprises à ce sujet dans les différents laboratoires de recherches téléphoniques au moyen de l'oscillographe électrique, d'amplificateurs et d'oscillateurs à lampes à trois électrodes, et de filtres électriques spéciaux permettant de ne laisser passer qu'une seule fréquence ou encore arrêtant toutes les fréquences supérieures ou inférieures à une certaine valeur.

» En ce qui concerne la mesure d'un microampère de courant alternatif (ou de quelques microwatts de puissance électrique), on peut espérer la réaliser bientôt, grâce aux lampes à 3 électrodes. Mais, pour le moment, les appareils à lampes ne peuvent guère servir qu'à effectuer des mesures relatives (et encore avec une assez grande approximation), à cause des nombreux facteurs très facilement variables qui influent sur leur fonctionne-

ment : manque d'uniformité dans la fabrication des lampes qui, quelque soin qu'on prenne en les choisissant, ne présentent jamais des caractéristiques rigoureusement identiques, — fluctuations de l'émission thermionique et du courant de plaque dues aux variations inévitables des batteries qui chauffent les filaments et chargent les plaques, — etc.....

» Aussi est-on loin, à fortiori, de réaliser, comme le souhaite M. Cahen, un microphone étalon absolu en associant un téléphone et un amplificateur.

» En résumé, le moment n'est pas encore venu de préconiser des méthodes de mesures d'efficacité des appareils téléphoniques purement électriques et d'une rigueur absolue. D'ailleurs, une rigueur extrême n'est pas nécessaire dans la pratique, étant donnée l'impossibilité de reproduire en grande série des appareils mathématiquement conformes à un étalon déterminé. Les méthodes téléphonométriques actuelles, comparables aux méthodes photométriques couramment employées pour les mesures d'intensité lumineuse, sont d'une précision suffisante pour la pratique courante où elles rendent de grands services.

» Je crois avoir répondu aux questions de M. Cahen.

» M. Courtois m'a demandé, d'autre part, si, au cours des essais effectués par l'Administration des Postes et Télégraphes, on avait eu l'occasion de rencontrer des appareils plus efficaces que l'étalon soit à la transmission, soit à la réception. Je peux répondre par l'affirmative, comme en font foi d'ailleurs les résultats indiqués ci-dessus.

» En ce qui concerne les objections de M. Ravut, M. Cahen y a déjà répondu en partie.

» L'analyse mathématique très brillante de M. Ravut peut en somme se résumer ainsi : Les résultats des mesures d'efficacité synthétisent deux ordres de phénomènes : 1° les rendements en énergie des appareils essayés ; 2° les pertes par réflexion aux différentes jonctions entre impédances différentes.

» Il en tire les conclusions suivantes : a) les mesures effectuées sur des microphones seuls (ou des récepteurs seuls) n'ont de va-

leur que si les microphones (ou les récepteurs) comparés entre eux sont de même type ; b) les mesures d'efficacité effectuées sur les postes complets ne sont valables que pour les communications échangées à travers des lignes ayant même « impédance caractéristique » que le câble étalon.

» Je suis tout à fait d'accord avec lui sur le premier point (a), et c'est pourquoi les mesures de microphones (ou de récepteurs) isolés n'ont jamais été faites, au Laboratoire des Postes et Télégraphes, qu'en vue de comparer entre eux les différents microphones Solid-back ou les différents récepteurs Bell destinés à servir d'étalons secondaires (ou étalons de travail).

» Par contre (et M. Cahen l'a d'ailleurs déjà reconnu), ce n'est pas l'*impédance caractéristique* de la ligne utilisée qu'il faut considérer quand on se préoccupe des pertes par réflexion, mais l'*impédance au départ* de cette ligne.

» Or, dans presque toutes les grandes villes (en particulier à Paris qui comprend plus du tiers des abonnés de toute la France), lorsque deux abonnés échangent une communication interurbaine, ils utilisent une ligne constituée par une section aérienne (ou, dans quelques années, lorsque le réseau de câbles prévu sera réalisé, une section de câble plus ou moins fortement pupinisé) terminée aux deux bouts par une section de câble non pupinisé (composée par la ligne auxiliaire qui relie le bureau de l'abonné au bureau central interurbain et par l'amorce souterraine, le plus souvent non pupinisée, du circuit interurbain).

» Or, l'impédance d'un tel ensemble, vue d'une des extrémités, se rapproche beaucoup de l'impédance au départ d'une section de 30 miles de câble standard (laquelle, cette fois, se confond sensiblement avec l'impédance caractéristique du câble étalon).

» Les mesures d'efficacité, telles qu'elles sont actuellement effectuées, tiennent par suite parfaitement compte, en ce qui concerne les pertes par réflexion, des conditions ordinaires dans lesquelles s'échangent les communications téléphoniques interurbaines entre abonnés des grandes villes.

» La critique adressée par M. Ravut aux essais de netteté résulte d'une équivoque qu'il est facile de dissiper : ce n'est pas, en effet, le câble étalon qui sert dans ces essais, mais une ligne arti-

ficielle sans déformation constituée par un ensemble de résistances non inductives et représentant une longue ligne aérienne.

» Enfin, dans les mesures d'effet local, le poste essayé débite sur un circuit équivalent au circuit standard, c'est-à-dire dans une impédance analogue à celle qui correspond aux conditions d'une conversation interurbaine normale. Ces mesures sont, par suite, tout à fait légitimes. »

SUR LES AMPOULES A RAYONS X.

M. P. VILLARD. — « Dans la très intéressante et instructive communication faite par M. Johannès, en décembre 1922, sur les ampoules à rayons X, on lit (page 565) que le régulateur à tube de platine ou de palladium (osmorégulateur) que j'ai créé en 1897 est à peu près abandonné aujourd'hui.

» Entièrement désintéressé à ce sujet, je puis dire en toute indépendance qu'il n'en est pas ainsi, précisément à cause de la sécurité de fonctionnement que M. Johannès reconnaît lui-même à cet appareil.

» Ce régulateur est d'ailleurs le seul qui permette d'extraire d'une ampoule le gaz (hydrogène) qu'on y aurait introduit en excès, et cette opération, souvent fort utile, n'est pas aussi lente que l'auteur croit devoir l'affirmer.

» Voici, à ce sujet, quelques précisions :

I. — Ampoule de 1 200 cm³, osmorégulateur en platine.

Durée de l'introduction de l'hydrogène (secondes)	Modification de la longueur de l'étincelle équivalente (centimètres)
25 à 30	de 20 à 10
40 à 45	de 25 à 5
(minutes)	
17.	de 10 à 20
12.	de 20 à 25
42.	de 5 à 25

II. — Ampoule de 600 cm³ osmorégulateur en palladium.

Durée de l'introduction de l'hydrogène (secondes)	Modification de la longueur de l'étincelle équivalente (centimètres)
4.	de 20 à 1
10.	de 10 à 20
15 à 20	de 5 à 25
50.	de 1 à 25

» Une pompe moléculaire n'irait probablement pas beaucoup plus vite que l'osmorégulateur en palladium, et on voudra bien reconnaître que l'extraction de l'hydrogène mérite mieux que d'être considérée comme une opération possible seulement « en principe ». Même avec le platine, les valeurs données plus haut montrent que l'emploi de ce procédé pour durcir une ampoule n'a rien d'impraticable.

» Page 541, M. Johannès écrit que la soupape à décharge ioni-

que peut redresser un courant alternatif de quelques milliers de volts.

» S'il en était ainsi, on n'en aurait pas construit plus de 12 000, car une telle soupape n'arrêterait même pas le courant inverse d'une bobine de Ruhmkorff, dont la tension peut atteindre 30 000 volts.

» C'est plusieurs dizaines de mille volts qu'il faut lire : l'étincelle équivalente d'une soupape, qui est de quelques millimètres avec un sens du courant, atteint normalement 10 centimètres dans le sens opposé. Deux soupapes en série suffisent pour rectifier le courant d'un transformateur donnant 20 cm d'étincelle et c'est ainsi que j'avais équipé, en 1901, le générateur pour stéréoradioscopie, dans lequel des condensateurs associés aux soupapes donnaient une tension double de celle fournie par le transformateur. ⁽¹⁾

» L'efficacité de la soupape serait moindre pour des tensions statiques et, sous ce rapport, comme sous celui de l'intensité admissible, le kénotron est préférable. Mais il n'existait pas à l'époque où a été créée la soupape et, même actuellement, celle-ci est encore couramment employée.

» Par ailleurs (page 546) la description du faisceau cathodique n'est pas entièrement conforme aux faits, et il est remarquable que la notion erronée de la convergence au centre de courbure de la cathode subsiste encore aujourd'hui, alors que, sans même parler de ce que j'ai écrit à ce sujet, les observations de Crookes, datant de quarante ans, établissaient qu'il n'en est rien.

» Des expériences extrêmement simples suffisent à montrer que les rayons cathodiques ne convergent généralement pas au centre de courbure d'une cathode concave : si d'ailleurs il en était ainsi, l'anticathode des ampoules à rayons X devrait évidemment occuper ce centre ; or, on la place ordinairement à une distance de la cathode voisine du triple du rayon de courbure de celle-ci, parfois au delà.

» Voici, en effet, comment les choses se passent :

» A la surface concave (seule utilisée) de la cathode, les lignes de force sont normales, non pas, comme le suppose M. Johannès, parce qu'il y a d'énormes charges positives tout auprès, mais sim-

⁽¹⁾ *Journal de Physique*, 1901, et *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, juin 1903.

plement parce qu'à la surface d'un conducteur la force est normale.

» Les électrons, émis presque sans vitesse initiale sous le choc de l'afflux positif, partent dans le sens de la force, c'est-à-dire normalement à la surface de la cathode, et se dirigent en effet d'abord vers son centre de courbure. Mais, dès qu'on s'écarte de la cathode, les lignes de force divergent pour aller rejoindre les charges positives des parois ; quelques-unes seulement vont à l'anode, qui est presque au même potentiel que les parois.

» M. Johannès dit à ce sujet que le champ n'est intense que près de la cathode, ce qui est exact, et, d'autre part, que toutes les lignes de force vont nécessairement de la cathode à l'anode, d'où évidemment un champ intense près de celle-ci, contrairement à la première supposition. Ce sont *les lignes de courant* qui vont d'une électrode à l'autre, mais il n'y a pas ici lieu de les considérer.

» Les lignes de force sont donc divergentes à peu de distance de la cathode. Toutefois les électrons, en vertu de leur inertie, ne les suivent pas ; leur direction primitive est cependant modifiée, leurs trajectoires s'incurvent et vont couper l'axe de la cathode, non plus au centre de courbure, mais un peu au delà et le faisceau cathodique, qui est creux, se présente comme un cône à génératrices courbes.

» Sous une autre forme, on peut dire que les rayons cathodiques, normaux à leur départ de la cathode, mais attirés ensuite par les charges positives des parois de l'ampoule, sont déviés vers ces parois et cessent, par suite, de se diriger vers le centre de courbure de la cathode.

» Rien n'est plus facile que d'observer et de photographier ces phénomènes dans une ampoule à rayons X pendant qu'on fait le vide : au début, quand la tension nécessaire au fonctionnement est de quelques milliers de volts seulement, le cône cathodique, très large à ce moment, converge presque au centre de la sphère à laquelle appartient la surface de la cathode. Mais, à mesure que la pression diminue, ce cône se déforme et s'allonge de plus en plus ; en même temps l'afflux cathodique, repoussé par les parois, se resserre autour de l'axe et la base du cône cathodique se rétrécit progressivement jusqu'à se réduire presque à un point. Le faisceau cathodique est alors très étroit et presque cylindrique.

» Il semble que l'attraction prolongée des parois devrait arriver à produire une divergence très appréciable des rayons ; en réalité, la déviation indiquée plus haut n'a lieu qu'au voisinage de la cathode ; plus loin, les électrons se déplacent dans une région où le champ est presque nul, et, se trouvant dans la partie axiale de l'ampoule, ne subissent, de la part des parois, que des attractions symétriques. Les trajectoires, un moment incurvées, deviennent donc ensuite sensiblement rectilignes.

» La technique usuelle, consistant à placer l'anticathode à une distance de la cathode très supérieure au rayon de courbure est donc parfaitement justifiée, le choix de cette distance étant d'ailleurs dicté par des considérations d'ordre empirique, dont certaines s'expliqueraient en tenant compte des conditions d'alimentation de l'afflux cathodique.

» Dans les ampoules Coolidge, la forme du champ est entièrement différente : les parois sont chargées non plus positivement, mais négativement et, surtout, les électrodes sont très rapprochées, d'où, entre elles, un champ très intense qui n'existait pas dans les ampoules à gaz.

» Mais, en raison des faibles dimensions et de la forme de ces électrodes (anticathode à 45°) le champ est loin d'être uniforme ; il n'est, par suite, pas exact de dire que, dans les ampoules Coolidge, la direction des rayons cathodiques est celle des lignes de force (page 578). L'inertie des électrons s'oppose, en effet, à ce qu'il en soit ainsi, sauf si les lignes de force sont des droites (champ uniforme) et si les électrons sont abandonnés dans ce champ sans vitesse initiale, ou avec une vitesse dirigée parallèlement à la force.

» J'ajouterai qu'au sujet de la relation qui existe entre l'espace obscur de Faraday et les rayons cathodiques, j'ai développé, dans « Le Journal de Physique » de l'année 1908, l'interprétation que M. Johannès semble présenter comme nouvelle (page 539). Une remarque analogue serait à faire à propos de l'origine et du rôle de l'afflux cathodique. »

RÉPONSE AUX OBSERVATIONS DE M. VILLARD SUR LES AMPOULES A RAYONS X.

M. JOHANNÈS. — « Je remercie M. Villard de la peine qu'il a prise de lire ma conférence et d'en préciser certains points.

» C'est bien par erreur que j'ai écrit que la soupape Villard ne pouvait redresser que quelques milliers de volts; c'est dizaines de milliers qu'il faut lire. J'ai écrit, d'ailleurs, (page 545), que ces soupapes pouvaient résister à des tensions de l'ordre de 50 kilovolts.

» Je me suis, aussi, souvent étonné que la notion erronée de la convergence au centre de la courbure de la cathode subsiste encore, et les explications de la note de M. Villard viennent heureusement préciser un paragraphe un peu obscur de ma conférence.

» Je vais donc chercher à rétablir le sens de ce que j'ai voulu dire, car je crois être tout à fait d'accord avec M. Villard.

» Les lignes de forces sont normales à la cathode parce que la force est normale à la surface d'un conducteur, dit M. Villard.

» J'ai écrit (page 546) :

« C'est apparemment exact que le champ est normal à cette surface »; il s'agit de la surface cathodique.

» Quant à la charge positive qui se trouve devant la cathode, je la crois aussi responsable du redressement des lignes de forces primitivement convergentes, mais sans doute avec un effet moindre que la charge des parois.

» Enfin, une regrettable erreur typographique qui m'a échappé lors des corrections m'a fait écrire une inexactitude.

» On lit (page 546) : Les lignes de forces vont bien de la cathode à l'anode. Or, j'ai voulu dire : *Des* lignes de forces vont bien de la cathode à l'anode. Ce qui a un sens complètement différent, conforme à la rectification de M. Villard.

» Je reconnais avoir fait un regrettable oubli, à cette conférence, en ne nommant pas le livre où j'ai fait de nombreux emprunts ⁽¹⁾ tant au point de vue théorique qu'expérimental. Mais

(1) *Les rayons cathodiques*, par P. VILLARD.

j'espère que M. Villard ne me tiendra pas rigueur de cette omission qui ne peut être qu'involontaire, car c'est en vain que l'on prétendrait s'attribuer la paternité de matières si connues contenues dans ce livre très clair.

» J'ai, d'ailleurs, également omis de citer Crookes, dont les travaux sur la « matière radiante » sont de toute première valeur ; dans mon oubli, M. Villard reste donc en illustre compagnie. »

**SUR LE DIAGRAMME DE LA CONNEXION SCOTT UTILISÉE POUR L'ALIMENTATION
DE DEUX RÉSEAUX MONOPHASÉS INDÉPENDANTS**

Dans cette communication, l'auteur développe le diagramme général de la connexion Scott pour l'usage mentionné ci-dessus, en supposant le côté primaire alimenté par du courant triphasé. Il démontre de quelle façon le triangle des courants primaires se déforme en fonction des deux charges secondaires.

M. STOKVIS. — « C'est pour tourner un brevet sur les moteurs triphasés asynchrones, que Scott imagina, il y a un demi-siècle, l'association de deux transformateurs qui porte son nom. Cette connexion avait pour but de transformer le courant triphasé en courant diphasé qui, lui, ne tombait pas sous le coup du brevet.

» Mais des études approfondies et comparatives prouvèrent bientôt que le courant diphasé ne possède aucun avantage sur le courant triphasé, bien au contraire ; pour une transmission d'énergie donnée, le diphasé exige plus de cuivre et, en transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, il lui faut des machines plus lourdes et plus volumineuses que celles nécessaires à son rival.

» Les brevets étant tombés dans le domaine public, la transformation Scott perdait toute sa raison d'être pour le but que lui assignait son auteur et on ne la trouve plus, en général, dans les livres d'enseignement qu'à titre de curiosité.

» Mais la transformation Scott reprend aujourd'hui un intérêt tout particulier comme transformateur de courant triphasé en deux courants monophasés indépendants.

» C'est précisément parce que la génération du courant triphasé est la plus économique et qu'elle est devenue quasi-universelle, que le besoin s'est fait sentir de pouvoir brancher des appareils monophasés sur une distribution triphasée.

» En effet, la technique moderne a délaissé entièrement le courant diphasé, mais les besoins en courant alternatif monophasé se font sentir de plus en plus.

» Les machines à souder, les fours électriques, les appareils de chauffage, les moteurs monophasés à collecteurs, les chemins de fer à traction monophasée, les puissantes lampes de cinéma, etc... sont tous des créations modernes et typiquement monophasées.

» En branchant sur une génératrice des transformateurs couplés en Scott, qui, eux, débitent sur deux impédances différentes, nous obtenons du côté triphasé trois courants déséquilibrés. Mais ces trois courants constituent pour la génératrice une charge

beaucoup plus favorable que si nous avions branché ces deux impédances directement sur deux phases.

» La connexion Scott adoucit les effets de la charge monophasée ; elle agit comme tampon équilibreur.

» Nous voyons par conséquent combien le problème de la connexion Scott est intimement lié à la charge déséquilibrée en général. Jetons donc un coup d'œil rétrospectif sur ce chapitre intéressant.

» Si une génératrice triphasée est chargée par trois courants dont la somme vectorielle est zéro, nous observons les phénomènes suivants, qui la distinguent du cas particulier :

» 1° L'échauffement n'est plus réparti comme en charge équilibrée ;

» 2° Le triangle équilatéral des tensions se déforme et se transforme en un triangle dont les côtés ne sont plus égaux ;

» 3° La tension aux bornes contient un harmonique trois, que même l'association des phases en étoile ne peut faire disparaître ;

» 4° Sur la tension continue, aux bornes des inducteurs, se superpose un harmonique deux ;

» 5° Les chutes de tension dans la ligne de départ ne sont plus égales et ne peuvent être calculées par les procédés habituels.

» Sauf le premier point, j'ai traité toutes les questions énumérées ci-dessus, la dernière en collaboration avec M. Lavanchy.

» Mais le problème de la charge déséquilibrée fait naître d'autres questions : celle de la définition même du déséquilibre. En fait ;

» 6° Si nous observons deux cas de déséquilibre, représentés par deux triangles de courants, lequel des deux est plus équilibré que l'autre ?

» 7° Et si nous observons, pour les trois courants, trois différents facteurs de puissance, quel facteur de puissance faut-il introduire dans les calculs ?

» Bien poser ces questions, c'est les résoudre à moitié.

» Faisons débiter à une génératrice triphasée trois courants différents. Si leur somme est zéro, ils peuvent être représentés par un triangle O P Q (fig. 1). J'ai démontré, dans une note présentée à l'Académie des Sciences, le 6 juillet 1914 (1), que cette

(1) Sur la création des harmoniques 3 dans les alternateurs par suite du déséquilibre des phases ; Louis G. Stokvis, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CLIX, p. 46.

charge peut être assimilée à deux charges équilibrées ; mais dont les bornes sont interverties. L'intensité de ces charges et leur position par rapport au triangle initial se trouvent d'une façon fort simple. Appelons la charge qui fait naître des champs tour-

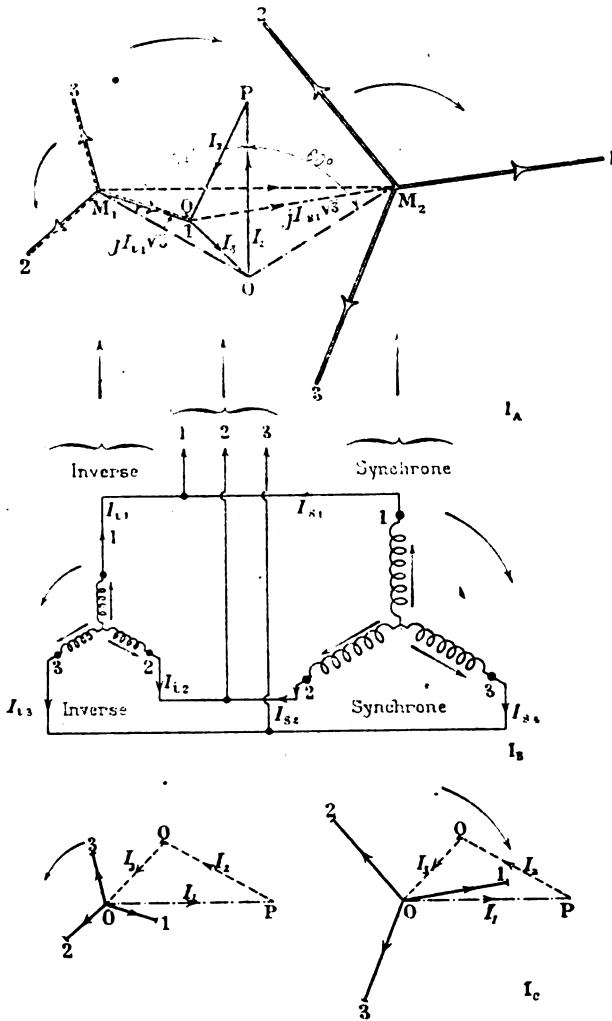


Fig. 1

nant dans le sens des inducteurs, la charge synchrone ; celle qui donne lieu à des champs tournant en sens inverse des inducteurs, la charge inverse, l'intensité de ces charges par phase étant I_s et I_i .

» Avançons le vecteur $OP = I_1$ de 60° , ce qui nous donne

O M_2 ; reculons le même vecteur du même angle, ce qui nous donne O M_1 .

» Alors le vecteur $M_1 Q$ représente (au facteur $j\sqrt{3}$ près) la composante due au système inverse I_i et $Q M_2$, la composante due au système synchrone I_s . Nous n'avons qu'à tracer autour de M_1 et M_2 des vecteurs égaux et déphasés de 120° , comme le montrent les figures 1 a et 1 c. Nous obtenons ainsi deux systèmes équilibrés, remplaçant entièrement le triangle O P Q.

» Le système inverse est la cause de l'harmonique trois dans l'induit et de l'harmonique deux dans l'inducteur.

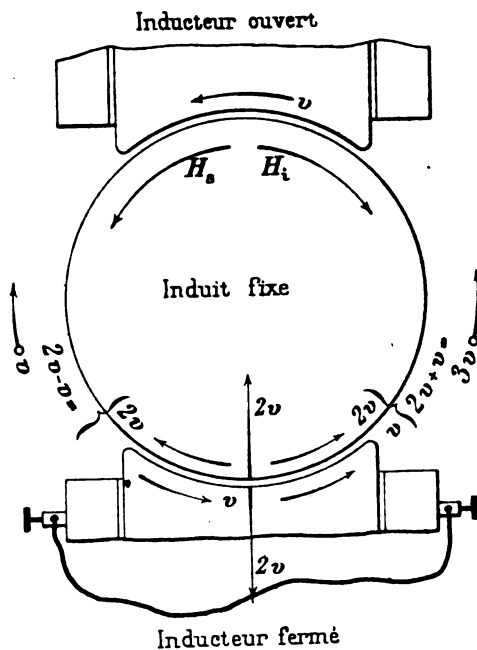


Fig. 2.

» Voici pourquoi (fig. 2). Le système synchrone fait naître un champ qui tourne *dans* le sens des inducteurs et son amplitude est proportionnelle au courant I_s . Ce champ ne se distingue en rien du champ qui naît en charge équilibrée ; seule, son amplitude est amoindrie.

» Le champ inverse est produit par le courant du système inverse. Il tourne à la vitesse v en sens inverse du mouvement des inducteurs. Considérons la vitesse des inducteurs comme positive, alors les champs inverses ont la vitesse $-v$; les champs synchrones, la vitesse $+v$. Le champ réel sera la superposition

de ces deux champs, de même que les trois courants réels ne sont que la superposition des courants du système synchrone et des courants du système inverse dans chaque phase.

» Le champ synchrone ne coupe pas les enroulements de l'inducteur, puisque sa vitesse relative par rapport à ce dernier est zéro. Par conséquent, le champ synchrone n'engendrera pas de force électromotrice dans les enroulements de l'inducteur. La seule réaction qui se manifestera sera une déformation du champ de l'inducteur, que l'on trouve également dans le cas de la charge équilibrée, qui peut se ramener à la théorie bien connue des deux réactions de M. Blondel.

» Mais le champ inverse coupe les enroulements de l'inducteur avec une vitesse $2v$. Par suite, il fera naître dans l'inducteur une force électromotrice dont la fréquence sera le double de la

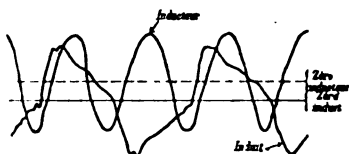


Fig. 3.

fréquence normale. Comme le montre notre oscillogramme de la figure 3, cette force électromotrice engendrera dans l'enroulement inducteur un courant de même fréquence $2f$, qui se superpose au courant d'excitation. A son tour, ce courant produit un champ pulsant de fréquence $2f$ et comme, suivant le théorème de M. Leblanc, un champ pulsant équivaut à deux champs tournant en sens inverse l'un de l'autre, le courant alternatif de fréquence $2f$ dans l'inducteur fait naître deux champs tournants, l'un de vitesse $+2v$, l'autre de vitesse $-2v$ par rapport à l'inducteur, comme on s'en rend compte sur la figure 2. Comme l'inducteur se meut avec la vitesse $+v$ par rapport à l'induit, il en résultera, finalement, deux champs qui tournent par rapport à l'induit :

- » a) L'un avec une vitesse $+2v + v = 3v$;
- » b) L'autre avec une vitesse $-2v + v = -v$.

» Le champ de vitesse $3v$ est l'origine de l'harmonique 3. On conçoit facilement que ce champ doit être proportionnel au courant I_i du système inverse, de sorte qu'en dernière analyse,

l'harmonique trois doit être proportionnel à ce dernier courant. Nous pouvons donc écrire $E_3 = j k_3 I_s$, où E_3 désigne la tension de l'harmonique trois et k_3 la réactance du système inverse.

» Nous attirons l'attention sur une particularité très intéressante de l'harmonique trois, excité par le champ du système inverse, qui le différencie de tout autre harmonique normalement engendré dans l'induit de la génératrice.

» Les harmoniques supérieurs, dans le cas d'une charge équilibrée, proviennent de ce que le champ tournant n'est pas rigoureusement sinusoïdal et peut être considéré comme la superposition de champs sinusoïdaux dont les longueurs d'onde décroissent en progression arithmétique. L'harmonique trois est normalement causé par un champ qui tourne à la même vitesse

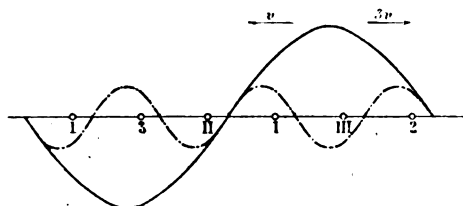


Fig. 4.

que l'harmonique un, mais qui a 3 ondes par double pas polaire au lieu d'en avoir une (fig. 4):

» On sait que, dans un montage en étoile, les tensions de l'harmonique trois engendrées dans les phases se détruisent puisque les conducteurs dans lesquels elles naissent se trouvent toujours dans le même champ. Elles sont, par suite, en opposition.

» Mais le champ inverse est un champ qui possède une longueur d'onde normale, c'est-à-dire une longueur d'onde correspondant au double pas polaire et il fait naître un harmonique 3 parce que sa vitesse est le triple de la vitesse normale. L'harmonique 3 créé dans la phase 1 sera ainsi déphasé de l'angle $\frac{2\pi}{3}$ sur celui créé dans la phase 2, tandis que, dans le cas de l'harmonique 3 engendré par un champ sinusoïdal en charge équilibrée, le déphasage des harmoniques 3 des 2 phases voisines est de 2π . Le montage en étoile est donc incapable de détruire l'harmonique 3 provenant du déséquilibre; il est donc faux de prétendre, comme on le trouve généralement dans les ouvrages d'enseigne-

ment technique, que le montage en étoile préserve de l'harmonique 3. L'effet est le même dans les deux cas, c'est-à-dire production d'un harmonique 3, mais les causes en sont différentes.

» Les raisonnements précédents nous conduisent à une définition précise du déséquilibre. C'est ce que j'ai fait, en présentant à l'Académie des Sciences une note à ce sujet le 26 mai 1922 ⁽¹⁾. Le déséquilibre sera d'autant plus fort que le champ du système inverse est plus important par rapport au champ du système synchrone. On peut donc tout naturellement définir

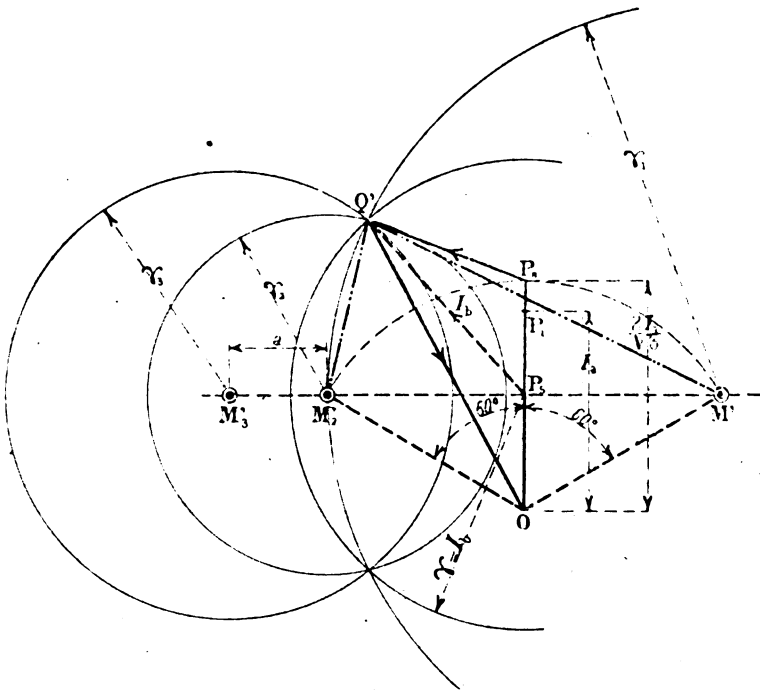


Fig. 5.

le déséquilibre ε , comme étant le quotient de l'intensité de ces deux champs ou, ce qui revient au même, comme étant le quotient du courant du système inverse par celui du courant du système synchrone.

» En charge équilibrée, le courant du système inverse est zéro ; cet état sera donc caractérisé par $\varepsilon = 0$; en courant mono-

⁽¹⁾ Sur les diagrammes circulaires des systèmes triphasés déséquilibrés et la définition de leur déséquilibre; Louis G. STOKYIS. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CLXXIV, p. 1418.

phasé, le courant du système inverse est égal au courant du système synchrone, de sorte que la charge monophasée sera caractérisée par $\varepsilon = 1$; le déséquilibre peut donc toujours s'exprimer par un chiffre compris entre 0 et l'unité.

» Il est facile de démontrer que, pour un même déséquilibre, le point Q du triangle OPQ se meut sur un cercle (fig. 5). Cette même propriété appartient aussi à tous les systèmes produisant l'harmonique 3, de même intensité, et ceux exerçant le même couple.

» En résumé donc, pour un système triphasé déséquilibré, il est possible de tracer trois diagrammes circulaires :

un cercle d'équivalence de	couple harmonique 3 lés quilibrage	ayant pour centre le point	M_1 M_2 M_3	et pour rayon	$\sqrt{3} I_s = \gamma_1$ $\sqrt{3} I_s = \gamma_2$ $M_1, M_2, \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon^2} = \gamma_3$
----------------------------------	--	----------------------------------	-------------------------	---------------------	--

» J'ai essayé, il y a quelque temps ⁽¹⁾, de définir la tension, l'intensité et le facteur de puissance, etc... d'un système déséquilibré. Procédant de la même façon, on pourrait considérer le déséquilibre des tensions, des puissances actives et réactives, comme étant également le quotient de la composante du système inverse par la composante du système synchrone de ces grandeurs.

» Il me reste encore un mot à dire sur le calcul de la chute de tension dans la génératrice. Dans la « Revue générale de l'Electricité » ⁽²⁾ et l'« Electrical World » ⁽³⁾ du 1^{er} mai 1915, j'ai expliqué la méthode à suivre.

» Sur la figure 5, nous avons représenté la caractéristique à vide d'une machine.

» Décomposons le courant I_1 en ses composantes correspondant au système synchrone $I_s = OP$ et au système inverse $I_i = PY$

⁽¹⁾ Sur la définition de la tension, de l'intensité et du facteur de puissance d'un système triphasé ; Louis G. STOKVIS. *Revue générale de l'Electricité*, 2 septembre 1922, t. XII, p. 307.

⁽²⁾ Essai d'une théorie générale des machines synchrones à courant alternatif basée sur les champs tournants sinusoïdaux ; Louis G. STOKVIS. *Revue générale de l'Electricité*, 9 et 16 juin 1923, t. XIII, p. 953-967 et 995-1 000.

⁽³⁾ Analysis of Unbalanced Three-Phase Systems ; Louis G. STOKVIS. *Electrical World*, 1 mai 1915.

Voir aussi Louis G. STOKVIS. *Der Spannungsabfall der synchronen Drehstromgenerators*, Oldenburg, Munich, Berlin 1912.

et dessinons sur du papier transparent le tracé caractéristique suivant (fig. 6).

$OK = r. I_1$ = chute de tension ohmique (en opposition à I_1) ;

$KL = j k_2 I_1$ = chute de tension dispersive (en quadrature avec I_1) ;

$LM = j k_i I_i$ = chute de tension due au champ du système inverse (perpendiculaire sur I_i) ;

$MN = j k_s I_s$ = chute de tension due au champ transversal divisée par le cosinus du déphasage *intérieur*.

$NS = - k_a I_i$ = ampère-tours antagonistes divisés par le cosinus du déphasage *intérieur*.

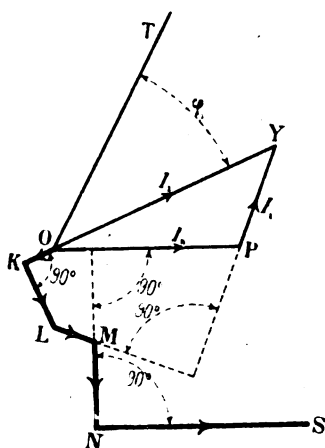


Fig. 6.

» Les constantes k_2 et k_i peuvent être obtenues par le calcul, ou par les essais classiques de la caractéristique à vide et en court-circuit; la constante k_s se calcule ou est déterminée par la méthode indiquée par M. Blondel par frotteur et galvanomètre. Pour la détermination du coefficient k_i , l'on peut se reporter à mes articles de la « Revue générale de l'Electricité » (1).

» Le tracé caractéristique peut donc être réalisé, connaissant I_1 , φ_1 et les valeurs des différentes réactances k . Fixons sur la caractéristique à vide (fig.7) la valeur de l'excitation donnée $Q_1 Q_2$. Plaçons le papier transparent sur la caractéristique à vide et faisons glisser le point M sur l'axe des abscisses et le point S sur une perpendiculaire abaissée de Q_2 sur l'axe des abscisses. Pour dif-

(1) *Revue générale de l'Electricité*, 28 octobre et 4 novembre 1922, t. XII, p. 619 et 661.

férentes positions du point M, nous obtiendrons différents points d'intersection de la direction de E_1 (dont la grandeur nous est inconnue) avec la caractéristique à vide. Une de ces positions est indiquée en pointillé.

» J'ai prouvé que, si la droite menée par ce point d'intersection T et le point N est perpendiculaire à l'axe des abscisses, O T représente la tension aux bornes de la phase I.

» En répétant cette même construction pour chaque phase, nous obtenons les tensions entre phases en décalant le diagramme

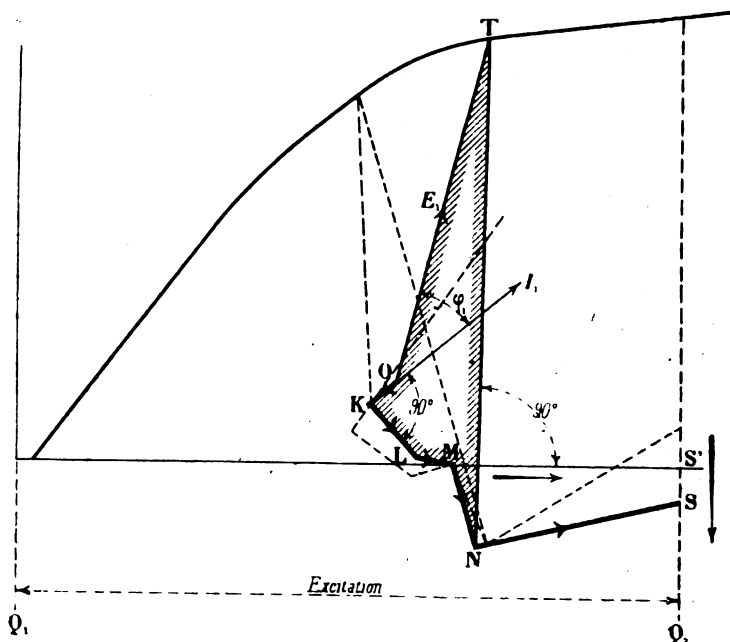


Fig. 7.

de la phase II de 120° de celui de la phase I et celui de la phase III, de 240° (¹).

» Pour donner une idée de ce procédé, nous allons l'appliquer à un cas concret, en reproduisant les diagrammes d'une génératrice de 255 kv-a (fig. 8). Pour une excitation de 5480 A-t, la tension à vide aux bornes est représentée par le triangle équilatéral 1-2-3, dont les côtés représentent 2 750 volts. En chargeant cette génératrice par trois impédances différentes qui font circuler dans les phases les courants 60 A, 35 A et 80 A avec des

(¹) *Revue générale de l'Electricité*, 9 juin 1923, t. XIII, p. 966.

facteurs de puissances 0,8, 0,90 et 0,83, le triangle se déforme comme nous le montre cette figure 8. Les tensions aux bornes deviennent 2 380, 2 250 et 2 230 v. Le déplacement du point neutre se mesure par la distance entre le centre de gravité 0 du triangle 1-2-3 et celui du triangle I, II, III, distance non représentée sur la figure et qui correspond à 80 v.

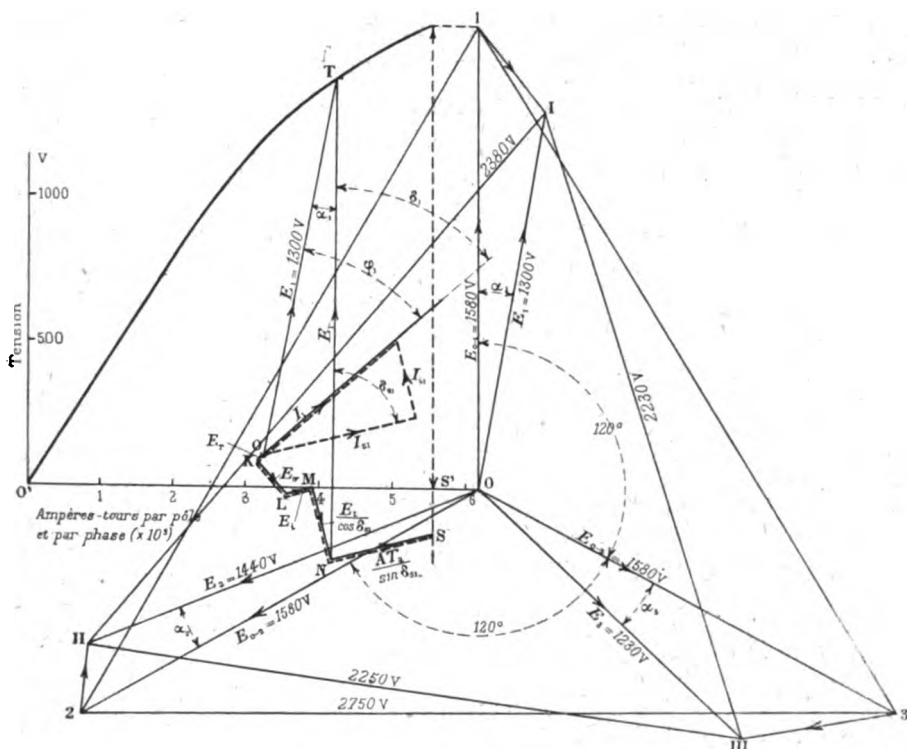


Fig. 8.

» Nous voyons donc que, par les théories développées ci-dessus, nous sommes à même de prévoir les principales manifestations de la charge déséquilibrée, aussi bien dans la machine que dans le réseau ⁽¹⁾.

» Avec ces connaissances, nous pouvons aborder la question qui fait l'objet de la présente communication.

» La figure 9 nous représente deux transformateurs A et B couplés suivant le montage Scott.

(1) Diagramme de la chute de tension dans un conducteur de ligne triphasée de tension moyenne ; Louis G. STOKVIS et Ch. LAVANCHY. *Revue générale de l'Electricité*, 6 janvier 1923, t. XIII, p. 3.

» Le transformateur A possède $\frac{n}{2} \sqrt{3}$ spires au primaire et γn spires au secondaire.

» Le transformateur B possède $\frac{n}{2}$ spires entre le point O et 2 et également $\frac{n}{2}$ spires entre le point O et 3.

» Les secondaires possèdent γn spires.

» Négligeons toutes les pertes, et désignons les courants primaires par I_1, I_2, I_3 ; les courants secondaires par I_s et I_b ; les courants secondaires correspondant aux deux parties du transformateur B, par I'_b et I''_b .

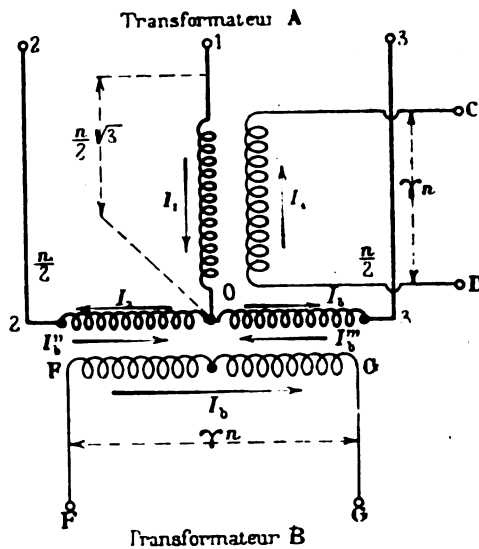


Fig. 9.

» En nous reportant à la figure 10 qui représente les tensions et les courants, nous pouvons écrire, suivant la loi de Kirchhoff, l'équation des courants autour du point O

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1)$$

» Nous avons trois transformateurs distincts, à savoir :

Spires au primaire	$\frac{n}{2} \sqrt{3}$	$\frac{n}{2}$	$\frac{n}{2}$
Spires au secondaire	γn	γn	γn
Courant primaire	I_1	I_2	I_3
Courant secondaire	I_s	I'_b	I''_b
	$-\frac{\sqrt{3}}{2\gamma} I_1$	$-\frac{I_2}{2\gamma}$	$-\frac{I_3}{2\gamma}$

» Soit $\overline{OP_2} = \overline{OP_1} = I_a$ et reculé de 30° sur OP_1 .

» Faisons $\overline{OP_3} = \frac{2}{3} \overline{OP_2} = \frac{2}{3} I_a$. Soit $\overline{OP_3}$ la projection de $\overline{OP_2}$ sur $\overline{OP_1}$.

$$\begin{aligned} \text{» On a } \overline{OP_3} &= \overline{OP_2} \cos 30^\circ = \frac{2}{3} \overline{OP_1} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \\ &= \frac{\overline{OP_1}}{\sqrt{3}} = \frac{I_a}{\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

» Menons la parallèle $P_5 Q'$ à $O Q_1$ de sorte que $P_5 Q' = I_b$.

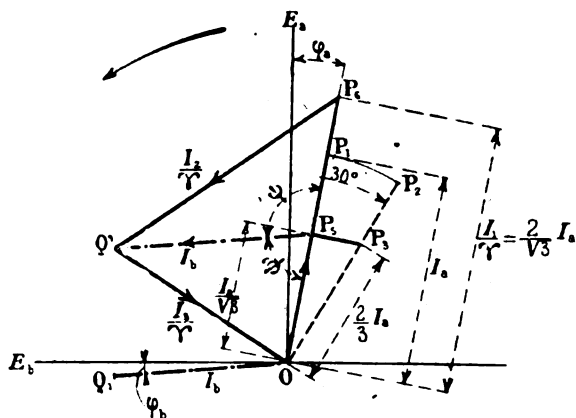


Fig. 11.

» Nous avons alors :

$$\begin{aligned} \overline{OP_5} + \overline{P_5 Q'} &= - \overline{Q' O} \\ \frac{I_a}{\sqrt{3}} + I_b &= - \frac{I_3}{\gamma} \end{aligned} \quad (9)$$

» Le vecteur $\overline{Q' O}$ nous représente donc (au facteur γ près) le courant I_3 suivant l'équation (8).

» Posons maintenant $\overline{OP_5} = \overline{P_5 P_6}$, de telle sorte que $\overline{OP_6} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_a$.

$\overline{OP_6}$ n'est donc autre que I_1 suivant l'équation (6).

» D'après l'équation (1), le vecteur $\overline{P_6 Q'}$ doit donc représenter (au facteur γ près) le vecteur I_2 .

» Le triangle $O P_6 Q'$ est donc le triangle des trois courants primaires I_1, I_2, I_3 (au facteur $\frac{1}{\gamma}$ près).

» Il est facile de déduire du diagramme que nous venons de développer quelques propriétés fort intéressantes.

» Supposons $I_a = I_b$ et $\varphi_a = \varphi_b$, ce qui correspond à la charge secondaire symétrique.

» L'angle $\angle OP_5Q'$ devient alors égal à 90° ; le triangle OP_5Q' est équilatéral et $I_1 = I_2 = I_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} I_a$ résultat classique.

Si $I_a < I_b$ et $\varphi_a < \varphi_b$, nous obtenons, en désignant par ψ l'angle $\angle OP_5Q'$ et par Ψ l'angle $\angle P_5P_6Q'$:

$$OQ'^2 = \overline{OP_5}^2 + \overline{P_5Q'}^2 - 2 \overline{OP_5} \times \overline{P_5Q'} \times \cos \psi \quad (10_a)$$

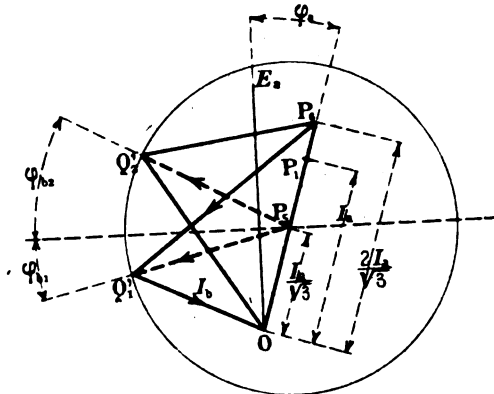


Fig. 12.

» Or, d'après la figure 11, en valeur absolue, on a :

$$\Psi' = \frac{\pi}{2} - (\varphi_a + \varphi_b);$$

mais en tenant compte que φ_a et φ_b sont de signes contraires, on peut écrire

$$\cos \Psi' = \sin (\varphi_a - \varphi_b) \text{ et } \cos \Psi = - \sin (\varphi_a - \varphi_b).$$

$$\frac{I_3^2}{\gamma^2} = \frac{I_a^2}{3} + I_b^2 - 2 \frac{I_a}{\sqrt{3}} \cdot I_b \sin (\varphi_a - \varphi_b) \quad (10_b)$$

$$\overline{P_6Q'}^2 = \overline{P_5P_6}^2 + \overline{P_5Q'}^2 - 2 \overline{P_5P_6} \times \overline{P_5Q'} \times \cos \Psi \quad (11_a)$$

$$\frac{I_2^2}{\gamma^2} = \frac{I_a^2}{2} + I_b^2 + 2 \frac{I_a}{\sqrt{3}} \cdot I_b \sin (\varphi_a - \varphi_b) \quad (11_b)$$

$$I_1 = \gamma \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} I_a \quad (12_a)$$

$$I_2 = \gamma \sqrt{I_b^2 + \frac{I_a^2}{3} - \frac{2}{\sqrt{3}} I_a \cdot I_b \sin (\varphi_a - \varphi_b)} \quad (12_b)$$

$$I_3 = \gamma \sqrt{I_b^2 + I_a^2 + \frac{2}{\sqrt{3}} I_a \cdot I_b \sin (\varphi_a - \varphi_b)} \quad (12_c)$$

» Soient dans la figure 11 les trois courants

$$\overline{OP_0} = \frac{I_1}{\gamma} \quad \overline{P_0Q'} = \frac{I_2}{\gamma} \quad \text{et} \quad \overline{Q'O} = \frac{I_3}{\gamma}.$$

» En reculant $\overline{OP_0}$ de 60° , on obtient $\overline{OM_1}$; au contraire, en l'avancant de 60° , on obtient $\overline{OM_2}$. La distance $\overline{M_1M_2}$ est telle que $\overline{M_1M_2} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon^2}$, où ε est le degré de déséquilibre défini ainsi (fig. 5) :

$$\varepsilon = \frac{Q'M_2}{Q'M}.$$

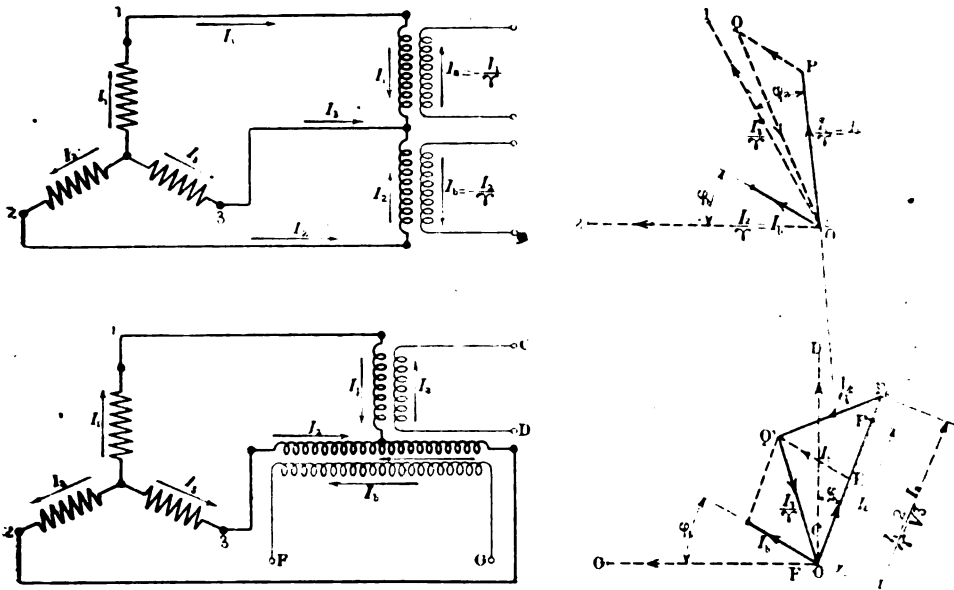


Fig. 14.

» Nous avons alors prouvé (fig. 5) que :

1° La distance $\overline{Q'M}$ est proportionnelle au couple exercé (cercle γ_1).

2° La distance $\overline{Q'M_2}$ est proportionnelle à l'harmonique 3 engendré (cercle γ_2).

3° La distance $\overline{Q'M_1}$ est proportionnelle au degré de déséquilibre (cercle γ).

» Le triangle OP_0Q' (fig. 11) correspond aux courants primaires, et pour les courants secondaires, on a :

$$I_a = \frac{OP_0\sqrt{3}}{2} \text{ dans le transformateur A,}$$

$$\text{et } I_b = \overline{P_0Q'} \text{ dans le transformateur B.}$$

» On peut poursuivre pas à pas les manifestations du déséquilibre en fonction de I_a et de I_b . Nous voyons déjà, dès maintenant, que, si nous maintenons le rapport $\frac{I_b}{I_a}$ constant, (cercle d'équivalence pour le côté secondaire ; centre P_5 , rayon I_b), il ne s'en suit pas pour cela que le côté primaire est équilibré, car Q' devrait alors se mouvoir sur le cercle de centre M' , et de rayon γ_1 .

» Afin de pousser plus loin la comparaison, considérons les figures 14_a et 14_b.

» La première schématise une génératrice dont les deux phases sont chargées par les courants I_a et I_b déphasés respectivement de φ_a et de φ_b par rapport aux tensions qui les font naître (3-1 et 3-2), et sur la seconde, le triangle $O P Q$ (fig. 14_a) représente les courants primaires résultant de cette charge.

» Reprenons la même machine affectée de la même charge, mais en faisant usage, cette fois, de la connexion Scott (fig. 14_c et 14_d). Le courant I_a est déphasé de φ_a par rapport à la tension mesurée entre les bornes C et D et I_b de φ_b par rapport à la tension entre les bornes F et G, ces deux tensions formant un angle de 90° .

» Conformément à la figure 11, nous construisons le diagramme des courants primaires :

$$\overline{OP_1} = I_a ; \quad \overline{OP_6} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_a \quad \overline{OP_5} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_a = \frac{OP_6}{2}$$

$\overline{P_5Q} = I_b$; le triangle des courants primaires correspond à $\overline{OP_6Q}$.

» Afin de pouvoir les comparer, transportons le triangle $\overline{OPQ}$ sur $\overline{OP_6Q'}$ (fig. 11), de sorte que $\overline{OP_6}$ et $\overline{OP}$ coïncident (fig. 15), P venant en P_1 .

» Nous observons d'abord deux choses :

» 1° Que la position réciproque de ces triangles ne dépend pas de la valeur absolue de φ_a et de φ_b , mais bien de leur différence $\varphi_b - \varphi_a = \psi$.

» Nous pouvons retrouver cet angle en menant par P_5 la perpendiculaire $S_1 S_2$ à $O Q_1$, alors l'angle $Q' P_5 S_1 = \psi$.

» 2° Que $Q P_1 = Q' P_5 = I_b$ (valeur absolue), mais que $Q P_1$ est reculé de 30° sur $\overline{Q' P_5}$.

» Il s'ensuit que nous pouvons obtenir le point Q en partant de Q', en menant $\overline{Q'Q''} = \frac{I_a}{2}$ parallèle à I_a et en faisant $Q''Q = 2I_b \sin 15^\circ = \frac{I_b}{2}$ en observant que $Q'Q''P_1 = 75^\circ$.

» De cette façon, nous arriverons à déterminer facilement le point Q du triangle des courants *sans* le système Scott, correspondant au point Q' du triangle des courants provenant du montage Scott.

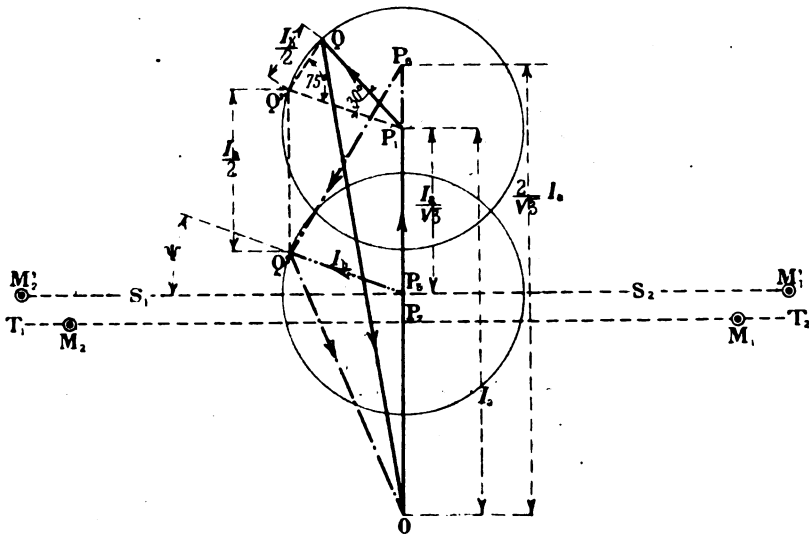


Fig. 15.

» Remarquons que les centres des cercles caractéristiques (fig. 15, M'_1 et M'_2) se trouvent sur la perpendiculaire $S_1 S_2$ menée par P_2 à $\overline{OP_1}$, quand il s'agit des connexions du système Scott; dans le cas contraire, ces centres se trouvent sur la perpendiculaire menée par P_1 ($\overline{OP_2} = \overline{P_1P_2} = \frac{I_2}{2}$).

» D'après la note présentée à l'Académie des Sciences ⁽¹⁾, l'amplitude de l'harmonique 3 est proportionnelle au vecteur $\overline{QM_2}$ (et pour le point Q' à $\overline{Q'M'_2}$) et le déséquilibre ε (ou ε' pour le système Scott) se définit :

$$\varepsilon = \frac{QM_2}{QM_1} \quad \varepsilon' = \frac{Q'M'_2}{Q'M'_1} \quad \dots \quad (13)$$

⁽¹⁾ Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CLXXIV, p. 1418.

» Désignons le déséquilibre secondaire par ε' et posons :

$$\varepsilon = \frac{I_b}{I_a} \quad (14)$$

» La figure 15 nous permet de suivre les grandeurs ε et ε' en fonction de ε' .

» Si nous gardons ε'' constant, le point Q' se meut sur un cercle de rayon I_b et de centre P_5 ; le point Q , sur un cercle de rayon égal, mais ayant comme centre P_1 (fig. 15).

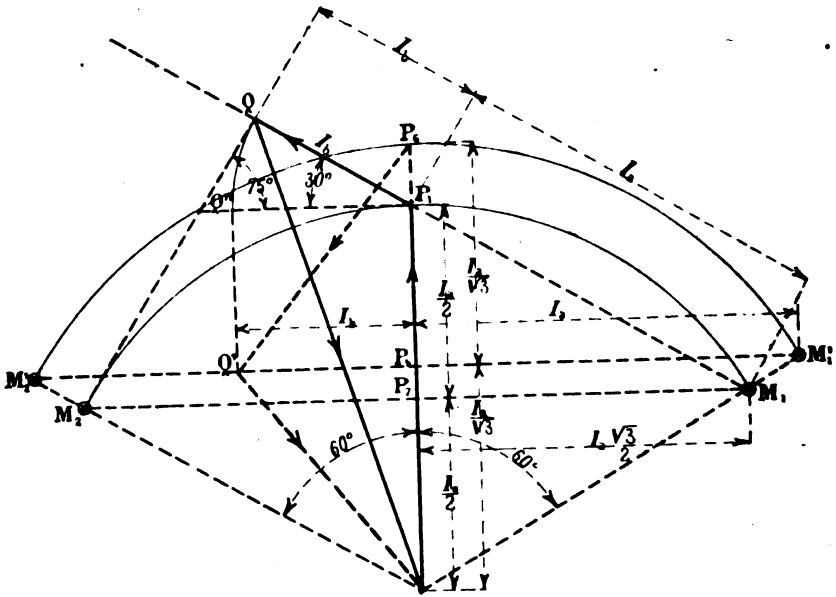


Fig. 16.

» Le cas le plus intéressant et le plus fréquent est celui où les facteurs de puissance secondaires sont égaux, $\cos \varphi_a = \cos \varphi_b$; d'où il résulte $\psi = 0$. Laissons I_a constant et prenons-le comme vecteur de référence. Laissons maintenant croître I_b de 0 à I_a , puis déterminons pour chaque valeur de ε'' les valeurs correspondances de ε et ε' .

Remarquons (fig. 16), que $\overline{M_1' Q'} = \overline{M_1 Q} = I_a + I_b \dots (15)$

» Nous en déduisons :

$$\varepsilon' = \frac{M_2 Q'}{M_1 Q'} = \frac{M_2 P_5 - Q' P_5}{M_1 P_5 - Q' P_5} = \frac{I_a - I_b}{I_a + I_b} \dots (16)$$

$$\varepsilon = \frac{M_2 Q}{M_1 Q} = \frac{M_2 Q}{M_1 P_1 + P_1 Q} = \frac{M_2 Q}{I_a + I_b} \dots (17)$$

» La valeur de $\overline{M, Q}$ varie entre I_a et $0,87 I_a = \frac{1}{2} \sqrt{3} I_a$. Afin de ne pas trop compliquer, nous allons la fixer à la valeur moyenne $0,95 I_a$; le résultat est donc vrai à quelques centièmes près et l'on a, successivement :

$$\varepsilon' = \frac{0,95 I_a}{I_a + I_b} = \frac{0,95}{1 + \frac{I_b}{I_a}} = \frac{0,95}{1 + \varepsilon''} \quad (19_a)$$

$$\varepsilon = \frac{I_a - I_b}{I_a + I_b} = \frac{1 - \varepsilon'}{1 + \varepsilon'} \quad (19_b)$$

» Considérons comme la variable indépendante et cherchons les valeurs que prennent ε et ε' quand ε'' varie de 0 à 1. Nous

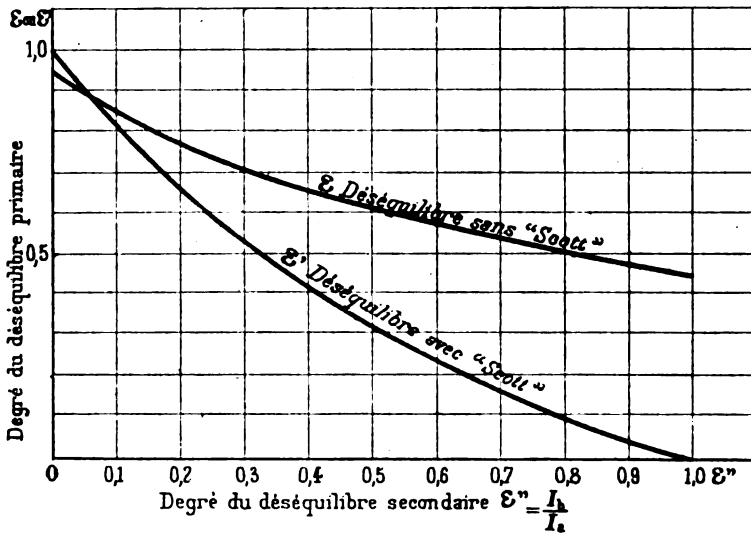


Fig. 17.

pouvons alors réunir les résultats dans un tableau et construire les courbes des variations ε et ε' comme il est indiqué en figure 17.

TABLEAU I

$\varepsilon = 0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\varepsilon = 0,95$	0,86	0,79	0,73	0,67	0,63	0,59	0,56	0,53	0,5	0,475
$\varepsilon = 1,00$	0,82	0,67	0,54	0,43	0,33	0,25	0,18	0,11	0,053	0,00

» Nous voyons, d'après le tableau et le graphique, le rôle im-

portant de la connexion « Scott » comme tampon ou bien comme équilibreur.

» Si nous avons, par exemple, 100 A aux bornes C et D (figure 9) et que nous désirions distribuer 60 A dans le tronçon B (bornes F et G), le déséquilibre secondaire ε' étant alors 0,6, le déséquilibre primaire devient : sans connexion Scott, 59 pour 100 ($\varepsilon = 0,59$) et avec connexion Scott, 25 pour 100 seulement ($\varepsilon' = 0,25$).

» Si nous désirons que dans le réseau B, l'intensité soit de 100 A, comme dans le réseau A, $\varepsilon'' = 1$ et le déséquilibre primaire sans connexion Scott devient 47 pour 100 ($\varepsilon = 0,47$) et avec connexion Scott zéro ($\varepsilon' = 0$).

» Il est possible d'établir une théorie très exacte par le même raisonnement, en tenant compte de toutes les pertes. Avec les trois courants primaires déterminés par la méthode présente, il est possible d'établir les chutes de tension dans les transformateurs, conformément aux méthodes classiques. C'est également avec les trois courants primaires que l'on peut obtenir la déformation du triangle équilatéral aux bornes de la génératrice, suivant les méthodes que je viens d'indiquer.

» Avec les transformateurs et les génératrices modernes, ces corrections sont tellement petites, qu'il est inutile d'en tenir compte dans les applications de la théorie que nous venons de développer. Mais il sera très important de suivre de près la génération de l'harmonique 3, comme je l'ai expliqué précédemment, étant donné que certains transformateurs ont tendance, par leurs propriétés magnétiques, à introduire eux-mêmes des harmoniques 3 dans le circuit, comme M. Swyngedauw l'a démontré ⁽¹⁾. Si la génératrice porte des amortisseurs Leblanc, le danger est diminué de beaucoup; il est en tous cas infiniment moins grand avec la connexion Scott que sans cette connexion, surtout si l'on shunte les inducteurs par de fortes capacités, comme je l'ai indiqué dans l'*Electrical World* ⁽²⁾.

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 12 janvier 1914.

⁽²⁾ *Electrical World*, 1^{er} mai 1915.

INFORMATIONS

I. — CRÉATION D'UNE MÉDAILLE D'HONNEUR TRIENNALE DITE MÉDAILLE MASCART.

Dans sa séance du 19 décembre 1923, le Comité, sur la proposition de son Bureau, a pris la délibération suivante :

« Il est créé par la Société française des Electriciens une Médaille d'honneur dite Médaille Mascart, en souvenir du savant éminent qui a fondé la Société, le Laboratoire central et l'Ecole supérieure d'Electricité.

» Cette médaille sera décernée tous les trois ans par le Comité, sur présentation du Bureau, à un savant ou à un ingénieur français ou étranger, membre ou non de la Société, qui se sera distingué par un ensemble de travaux sur l'Electricité pure ou appliquée.

» La médaille choisie sera celle exécutée par Chaplain, à l'effigie de Mascart, pour son jubilé.

» Elle portera au revers : le nom de la Société française des Electriciens; le nom du titulaire; la date d'attribution. »

II. — AFFECTATION DES LEGS EN 1923.

Dans sa séance du 19 décembre 1923, le Comité a décidé d'affecter comme suit, en 1923, le montant des legs dont la Société dispose :

Le legs Hughes (1 824 fr), à M. Guilbert André;

Le legs Cheux (1 945 fr), à M. Rey du Boissieu (Détermination du coefficient d'éclairement des immeubles);

Le legs Ancel (700 fr), à M. le commandant Mesny (pour sa communication sur les ondes courtes).

III. — ORGANISATION D'ESSAIS CONTROLÉS D'APPAREILS D'APPEL DE T. S. F. POUVANT ÊTRE UTILISÉS SUR LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'ÉNERGIE

Le Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique a prié la Société française des Electriciens d'organiser des essais contrôlés d'appareils de T. S. F. devant permettre à la Station centrale d'appeler un agent du réseau à un

poste d'écoute pour y recevoir des instructions sans lui imposer de s'y tenir en permanence. Des appareils remplissant cette condition fonctionnent à bord des navires. Certains réseaux en sont munis, mais tous n'en tirent pas la même satisfaction.

Le Comité de la Société française des Electriciens s'est prêté bien volontiers à organiser des essais en vue d'améliorer cette situation. Dans sa séance du 19 décembre 1923, il a décidé de compléter à 25 000 fr la somme prévue pour les prix et dont la majeure partie a été fournie par le Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique, le Syndicat des Fabricants de Fils et Câbles et le Syndicat professionnel des Industries électriques.

Une Commission a été nommée comprenant avec des membres de la Société française des Electriciens, des représentants des Syndicats donateurs et du Syndicat des Industries radio-électriques.

Cette Commission élabore le programme des essais, qui auront lieu vraisemblablement au cours de l'été prochain et qui donneront lieu à un rapport sur les appareils présentés.

IV. — COMPTE RENDU DE LA VISITE FAITE PAR LA SOCIÉTÉ AU LABORATOIRE AMPÈRE A UN MILLION DE VOLTS, DE LA COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ELECTROCÉRAMIQUE.

Le Conseil d'administration de la Compagnie générale d'Electrocéramique a bien voulu inviter les membres parisiens de la Société française des Electriciens à visiter, le lundi 17 décembre, cette installation qui fonctionne à la plus haute tension réalisée industriellement en Europe.

Ceux qui ont été assez heureux pour pouvoir s'y rendre ont été reçus par MM. Tassard, Chauveau, Bellon et Croutelle qui avaient tous quatre, à des titres divers, été les maîtres de l'œuvre. Après avoir entendu des explications très complètes, obligeamment fournies par MM. Bellon et Croutelle sur le montage des transformateurs Haeffely, les invités assistèrent à une série d'expériences, qui furent toutes très brillamment réussies.

Ils virent de longues étincelles jaillir entre les deux sphères de cuivre de 1,50 m de diamètre, constituant l'éclateur de l'appareil, puis, sur une distance de 2,50 m, entre les pointes d'un

éclateur de contrôle, ou encore, franchir les dix éléments d'une chaîne d'isolateurs.

Pendant ce temps, sous l'influence du champ statique, un tourniquet à pointes tournait éperdument et les enveloppes des résistances liquides qui assuraient la connexion des transformateurs à l'éclateur se hérissant d'effluves prenaient, dans l'obscurité, l'aspect d'énormes chenilles violettes.

Les spectateurs, imprégnés d'ozone, les cheveux caressés par le souffle électrique, ne pouvaient douter de la grandeur des tensions mises en jeu. D'ailleurs, deux personnes placées côte à côte, l'une sur un tabouret isolant, l'autre directement sur le sol, tiraient des étincelles longues et nourries des tiges de métal que chacune d'elles tenait en main.

Pour terminer, nous vîmes tourner un cylindre d'haefelite simplement posé sur pivot, entre trois électrodes respectivement reliées aux pôles à 500 000 volts. Le jour où il vit démarrer cet étrange appareil, M. Saily, l'Administrateur délégué de la Compagnie Electrocéramique, salua en lui le moteur à plus haute tension et à plus bas rendement qui ait jamais été réalisé. Un de nos collègues évoqua à ce propos le souvenir classique de l'« elektron », qui, entre les doigts de Thalès, triomphait de l'inertie des corps : une fois de plus, le symbolique serpent se mordait la queue.

Nous exprimâmes à nos hôtes, en les quittant, notre sincère admiration pour la réalisation impeccable de leur installation et nos vifs remerciements pour nous avoir invités à la voir fonctionner.

M. Tassard, de son côté, a bien voulu nous assurer qu'il la mettrait à la disposition du personnel du Laboratoire central et même des membres de la Société, pour toute recherche ou pour tout essai qui les intéresserait, et cela dans les meilleures conditions possibles.

V. — COMPTE RENDU DES VISITES FAITES PAR LA SOCIÉTÉ A L'EXPOSITION DE PHYSIQUE ET DE T. S. F.

Les 13, 22 et 24 décembre, notre ancien Vice-Président, M. de Valbreuze, Commissaire général, a bien voulu accueillir à l'Exposition les membres de la Société française des Electriciens.

En même temps que lui, nous devons remercier notre Prési-

dent, M. Eschwège; M. Brylinski, Président du Comité d'organisation de l'Exposition; MM. Lemenand, Marsat, Routin, qui se sont chargés du soin de guider les groupes de visiteurs dans l'Exposition, et les exposants qui se sont rendus à leur stand, malgré l'heure matinale, pour fournir à nos membres toutes les explications désirables.

M. le Professeur Pérot, notre Vice-Président, a répété devant nous ses remarquables expériences sur la mesure du champ magnétique; M. le Commandant Mesny nous a fait constater, sur une distance de quelques mètres, la distance des nœuds et des ventres de ses ondes courtes; M. Chaumat nous a expliqué le principe de son wattmètre; M. Claude nous a fait une étourdissante conférence sur l'air liquide et a jonglé sous nos yeux avec ses composants, puis il nous a montré, en chambre noire, les objets éclairés comme à la lumière du jour par la synthèse des rayonnements de la lampe au mercure et de la lampe au néon; M. Soulier a fait valser son œuf d'autruche sous l'action des champs tournants; M. Lemoine a répété ses très curieuses expériences sur le gyroscope et sur les mouvements giratoires, tandis que, à ses côtés, M. Sosnowski nous faisait apercevoir les périodes critiques par lesquelles passe à vitesses croissantes la rotation d'un arbre flexible; M. Guillet nous a exposé les richesses de son laboratoire et notamment un très intéressant dilatomètre enregistreur qui trace une courbe où se révèlent les changements d'état d'un métal à mesure que la température s'élève; M. Bethenod nous a montré les vénérables appareils de son exposition rétrospective, à laquelle il avait consacré tant de soins et de peines.

Parmi les industriels qui ont apporté le plus grand empressement à nous documenter, nous citerons MM. Parsons, Lartigue, de Saint-Germain, de la Compagnie française Thomson-Houston, qui nous ont montré leurs appareils de signalisation, leurs redresseurs, leurs lampes, leurs échantillons de quartz d'une transparence étonnante, leurs transformateurs, leurs soupapes électrolytiques, leurs téléphones automatiques, pendant que M. Magunna nous faisait les honneurs des appareils construits par la Compagnie générale Electrique de Nancy.

MM. Bitterli et Legros, de la Compagnie générale d'Electricité, nous ont présenté les isolateurs à chaînes des Ateliers de Delle,

les moteurs des Ateliers d'Orléans, et des pièces fabriquées par la Manufacture d'Isolants en cégéite, lactolite, etc., matières protéiformes auxquelles recourent constructeurs et exploitants pour résoudre avec sécurité les innombrables problèmes que pose l'inéluctable nécessité d'isoler les conducteurs.

MM. Grandjean et Goldschmidt, de la Compagnie générale d'Entreprises électriques, ont présenté en même temps que les régulateurs Cuénod, le poste extérieur de coupure à 150 000 volts qui, de l'avis de M. le Ministre des Travaux publics, a constitué le clou de l'Exposition.

Au stand de la Société industrielle des Téléphones, MM. Vallée et Carrier ont détaillé leurs installations de téléphonie automatique et leurs nouveaux modèles d'appareillage. M. Varangot nous a présenté les lampes d'éclairage et les lampes pour T. S. F. fabriquées par la Compagnie générale des Lampes, et quelques-uns d'entre nous, trop rares malheureusement, ont pu suivre l'histoire de la lampe à incandescence en parcourant l'exposition de modèles, dont le premier remonte à 1841.

M. Gindre a exposé les importants avantages de sa pile à dépoliarisation par l'air.

M. Pomey, le très distingué Directeur de l'Ecole des Postes et Télégraphes, a bien voulu faire mettre en œuvre devant nos yeux les méthodes d'essai des appareils téléphoniques, la manœuvre des appareils Baudot dotés de leurs derniers perfectionnements et celle des récepteurs de T. S. F. transmettant en Morse.

M. Eschwège nous a conduits au stand de la Société A.P.E.L., où nous avons cru retrouver ces fées bienfaisantes qui, il y a bien longtemps, réalisaient d'un coup de baguette les vœux à peine formulés des pauvres humains.

Nous avons examiné, avec le plus vif intérêt, dans le stand des Forges et Ateliers de Jeumont, le câble à trois conducteurs sous une même enveloppe, destiné à fonctionner sous la tension de 60 000 volts entre phases. L'annonce des résultats obtenus grâce aux procédés de fabrication appliqués dans la confection de ce câble venait de faire sensation à la Conférence internationale des grands Réseaux à très haute tension.

Devant le stand de la Bakélite, nous avons pu nous rendre compte des emplois innombrables et de la souplesse d'application de cette matière isolante.

A la Compagnie de Radiotélégraphie, nous avons remarqué la consommation extrêmement faible des nouvelles lampes.

M. Belin a répété devant nous ses remarquables expériences de transmission des images; grâce à ses procédés si ingénieux les dépêches en toutes langues sont régulièrement transmises de Paris à Lyon et de Paris à Strasbourg, sans qu'il y ait lieu de craindre aucune erreur de lecture.

Au stand de l'Office de M. Léauté, nous avons constaté l'extraordinaire exiguité des tubes à mercure permettant de couper sous haute tension des intensités notables sans qu'il en résulte aucune altération de la surface du mercure, grâce au gaz inerte qui remplit le tube.

M. Gaiffe nous a montré son poste de radiothérapie fonctionnant sous 250 000 volts et produisant, grâce au tube Coolidge, des rayons si pénétrants que la lutte victorieuse contre le cancer peut dès maintenant être envisagée, et que les vacuoles occluses au sein des masses métalliques sont décelées par ces radiations qui ne connaissent pas d'obstacles.

Il faudrait, pour mentionner seulement toutes les installations intéressantes qu'abritait le hall du Grand-Palais, y consacrer entièrement tous les bulletins de l'année. Nous nous bornerons donc à renouveler nos plus vifs remerciements aux organisateurs de cette entreprise si complètement réussie et à tous les exposants qui ont bien voulu nous consacrer, à trois reprises, une part de leur temps si précieux.

VI. — TRAVAUX DES SECTIONS (1)

1^{re} SECTION. — *Production de l'Electricité*. Président : M. Roth.

Séance du 3 octobre 1923. — Spécification des machines. — La Section a entendu un exposé de M. Darrieus sur la question de savoir si la spécification des machines électriques doit être établie sur le régime continu ou sur le régime avec surcharges.

M. Darrieus rappelle que la substitution de la température ambiante de 30° C à celle de 40° C, admise jusqu'ici par les constructeurs français reviendrait à autoriser des échauffements de 10° supérieurs. L'expérience des constructeurs les a amenés à recon-

(1) Tout membre de la Société française des Electriciens peut, en adressant une demande au Délégué général, 14, rue de Staël, être convoqué aux séances des Sections.

naître que la spécification à régime continu sans surcharge ou à régime thermiquement équivalent aux régimes avec surcharges est la plus simple et la plus naturelle ; il paraît d'ailleurs très arbitraire de chercher à représenter par un régime schématique quelconque avec surcharge les régimes infiniment variés qu'impose la pratique.

De plus, si l'on considère les échauffements des différentes parties d'une machine, on est conduit à les représenter par trois courbes exponentielles au moins, qui se différencient nettement au début de la surcharge ; l'analyse du phénomène exigera donc, en général, la considération d'au moins six constantes arbitraires et des calculs assez complexes.

M. Darrieus conclut en proposant le maintien de la spécification d'après le régime continu et la Section s'est rangée à cet avis.

Séance du 5 novembre 1923. — Adoption de fascicules de l'Union des Syndicats d'Electricité. — La Section a examiné et approuvé les trois fascicules ci-après, établis par l'Union des Syndicats d'Electricité et sur lesquels le Comité électrotechnique Français avait demandé l'avis de la Société française des Electriciens :

131 *ter*. — Modifications aux règles françaises d'unification.

2^e partie. — Conditions auxquelles doit satisfaire une machine électrique.

131 *quater*. — Modifications aux règles françaises d'unification. Définition des régimes et services des machines électriques.

182. — Règles complémentaires d'unification. Normalisation des transformateurs.

Coefficient de déformation des courbes d'alternateurs. — L'ordre du jour appelait ensuite, sur une suggestion de M. Legros, la recherche d'une méthode pour la détermination du coefficient de déformation des courbes d'alternateurs.

La méthode indiquée par le Comité électrotechnique Français a conduit à des désaccords considérables entre les constructeurs qui l'ont appliquée.

M. Legros attribue ces erreurs à la difficulté des lectures graphiques et des travaux de planimétrie.

M. de Pistoye a signalé que les erreurs dues à la fréquence élevée de certains harmoniques sont atténuées quand l'alternateur est conduit à une vitesse réduite.

M. Drouin a proposé d'opérer d'abord sur des courbes construi-

tes en superposant des courbes harmoniques connues, puis sur des courbes oscillographiques réelles.

M. Bethenod a exprimé l'avis que les courbes à analyser pourraient être obtenues artificiellement par superposition des courbes de plusieurs alternateurs mécaniquement accouplés.

M. Roth a bien voulu se charger de préparer des courbes et de les répartir entre les intéressés en indiquant à chacun d'eux la méthode de calcul à suivre.

Etude des isolants utilisés dans les machines. — La Section a estimé que, parallèlement à l'étude poursuivie par l'Union des Syndicats de l'Electricité sur les isolants synthétiques en général, elle pourrait entreprendre une étude qu'elle restreindrait aux seuls isolants employés dans les machines.

Les constructeurs qui ont déjà effectué des essais seront donc invités à les faire contrôler par le Laboratoire central d'Electricité et à en adresser les résultats au président de la première Section.

2^e SECTION. — *Eclairage.* Président : M. Lehaupin.

Séance du 20 novembre 1923. — Cahier des charges pour la fourniture des lampes d'automobiles. — L'accord n'a pu se faire avec la Chambre syndicale des Fabricants d'accessoires d'automobiles sur le texte qui avait été accepté par sa Section des lampes. Notamment cette Chambre n'admet pas la substitution immédiate de la spécification des lampes en lumens à l'ancienne spécification en bougies, bien que l'adoption de la nouvelle unité ait été consacrée par la loi du 2 avril 1919 et par le décret du 26 juillet 1919 ; elle persiste, en outre, à imposer l'essai au choc que les fabricants de lampes déclarent ne pouvoir accepter.

La 2^e Section a décidé de procéder à des essais sur les lampes de fabrications étrangères avant d'arrêter les conditions à inscrire au cahier des charges dont elle proposera l'homologation à l'Union des Syndicats d'Electricité.

Cahier des charges pour lampes à milieu gazeux. — Le texte définitif de ce cahier des charges, complété par les diagrammes à 6 limites et par le tableau des tolérances, sera présenté à l'une des prochaines séances de la deuxième Section.

Legs Cheux. — La Section a émis le vœu que ce legs lui soit attribué par la Société française des Electriciens, pour lui permettre de déterminer le coefficient d'éclairement intérieur des immeu-

bles (quotient de l'éclairement à l'extérieur par l'éclairement à l'intérieur des diverses pièces).

Eclairage des locaux industriels. — Des expériences pratiques seront entreprises pour déterminer l'éclairement minimum permettant de voir nettement les marches d'un escalier.

3^e SECTION. — *Electrochimie, électrometallurgie.*

Président : M. Bunet.

Séance du 15 novembre 1923. — M. Ribaud, de l'Institut de Physique de Strasbourg, était venu à Paris pour prendre part à la discussion, en Section, de sa communication faite à la séance publique de novembre sur les fours à haute fréquence.

Répondant aux nombreuses questions posées par les métallurgistes présents, il a exposé l'état actuel des applications industrielles du chauffage à haute fréquence. Ces installations, dont la puissance atteint parfois 105 kw et dont le rendement est élevé, commencent à se répandre aux Etats-Unis.

En France, il n'existe pas encore d'installations industrielles. Celle réalisée par M. Ribaud, d'une puissance de 75 kw seulement, est destinée aux recherches sur les produits réfractaires et sur les très hautes températures.

Les conditions électriques varient avec le problème industriel posé et doivent être étudiées pour chaque cas particulier.

En principe, la fréquence doit toujours être supérieure à 10 000 p.s. Les condensateurs peuvent être d'un type quelconque. Le transformateur doit présenter un coefficient de sécurité suffisant pour résister aux surtensions qui sont fréquentes.

Le réglage de la température se fait d'une manière très souple en agissant sur la vitesse de l'éclateur.

M. Bunet maintient les questions suivantes à l'ordre du jour de la 3^e Section :

- 1^o Etude générale des fours électriques.
- 2^o Electrometallurgie du fer.
- 3^o Electrolyse de l'eau.

Il est fait appel aux spécialistes pour obtenir une documentation complète sur la première question.

Au sujet de l'électrometallurgie du fer, M. Bunet rappelle que les électriciens recherchent un métal à faible hystérésis. Or, le fer

électrolytique à 99,7 pour 100 de fer possède une hystérésis élevée due à l'hydrogène occlus qu'il est très difficile d'éliminer, même par une fusion prolongée dans le vide.

4^e SECTION. — *Distribution. Traction.* Président: M. Parodi.

Présidents des Sous-Sections :

Appareillage : M. Darrieus.

Canalisations : M. Barillot.

Traction : M. Pèridier.

Examen de fascicules de l'Union des Syndicats d'Electricité. — La Section a examiné les fascicules ci-après transmis pour avis à la Société française des Electriciens par le Comité électrotechnique français.

N° 168. — Règles de normalisation du gros appareillage électrique.

N° 181. — Règles de normalisation des appareils de chauffage électrique.

N° 185. — Normalisation des intensités de courant pour l'appareillage électrique.

N° 186. — Cahier des charges pour la fourniture des conducteurs isolés en caoutchouc.

N° 188. — Cahier des charges pour la fourniture des câbles sous plomb isolés au papier imprégné.

Au sujet du fascicule N° 168, M. Girault a demandé que les règles d'échauffement limite qui y sont prévues ne soient pas applicables aux contacteurs et rupteurs électromagnétiques et électropneumatiques, ni aux combinateurs à contacts mobiles et à surface cylindrique, mais qu'il soit établi des règles particulières pour ce matériel.

La Section a décidé de transmettre ces réserves au Comité électrotechnique français et d'adopter les autres fascicules.

Redresseurs à vapeur de mercure. — Dans l'attente d'une communication sur ce sujet promise par M. Maurice Leblanc, la Section a exprimé le vœu qu'il lui soit apporté une mise au point complète de la question, tirée des publications faites dans les périodiques. Il est fait appel aux membres de la Société auxquels leurs études habituelles faciliteraient ce travail.

Discussion sur les méthodes de calcul des lignes à haute tension.

— Sur l'invitation de M. le président, M. Lachaise fit ressortir les différences présentées par l'abaque de miss Clarke avec les abaques similaires, notamment avec celui de M. Blondel.

L'abaque de Clarke, comme cela est aussi parfaitement réalisable avec l'abaque Blondel, matérialise un diagramme au moyen de rapporteurs et de règlettes graduées mobiles. Son emploi s'étend jusqu'aux lignes de 650 km, c'est-à-dire jusqu'à des longueurs dépassant celles usitées en Europe.

De même que dans l'abaque Blondel, une des variables est le rapport des puissances reçues au carré des tensions à l'extrémité réceptrice.

Mais l'emploi de l'abaque Blondel exige du calculateur la connaissance des imaginaires, ainsi que le calcul préalable de l'impédance caractéristique vectorielle et de la constante linéique de propagation, tandis qu'un employé quelconque peut être mis rapidement à même de se servir de l'abaque de Clarke. Le président fit ressortir que l'usage fait par miss Clarke du principe de similitude permet d'éliminer une variable dans le nombre assez grand de celles que le problème comporte : les variables conservées sont des quantités physiques, résistance, longueur de la ligne, etc... Les erreurs commises apparaissent donc immédiatement.

L'abaque de Clarke donne des résultats précis pour les lignes de 200 à 300 km, alors que pour ces distances l'abaque Blondel, sous sa forme commerciale, nécessite des interpolations qui sont des causes d'erreurs appréciables.

L'abaque de Clarke permet de calculer un très grand nombre de points, ce qui est précieux pour obtenir, par approximations successives, la répartition des puissance active et réactive dans un réseau complexe.

Il fait ressortir en outre, de façon tangible, l'influence des différentes variables et permet de résoudre graphiquement un grand nombre de problèmes dont la solution serait inextricable par le calcul.

La General Electric Co a étudié les divers régimes de fonctionnement sur le réseau électrique de l'Orléans, par approximations successives et en utilisant les courbes de l'abaque de Clarke.

L'étude d'un régime de fonctionnement demandait trois jours de travail à trois opérateurs.

Le problème se pose de la même manière pour le réseau national de France.

Le président a exprimé le vœu que les exploitants lui fassent connaître leur avis sur l'intérêt particulier présenté par l'emploi de l'abaque de Clarke.

M. Darrieus a fait observer que la concordance entre les courbes obtenues, d'une part, par la méthode approchée, et d'autre part, par la méthode exacte, est beaucoup plus satisfaisante si, au lieu des sous-stations elles-mêmes, on fait intervenir les intervalles entre les sous-stations.

M. Thielemans a rappelé la solution donnée par lui au problème de la répartition des charges par l'emploi de diagrammes où se lisent directement les valeurs des puissances active et réactive.

Sur l'invitation du président, M. Darrieus a rappelé les traits essentiels de l'étude qu'il a publiée dans le Bulletin de vacances.

Il fit ressortir notamment que l'on obtient plus de précision en traçant les cercles de pertes constantes qui ont tous leur centre commun sur l'épure, qu'en traçant les cercles d'égal rendement.

5^e SECTION. — *Télégraphie, Téléphonie.* Président : M. Langevin.

Président suppléant : M. Bethenod.

Séance du 7 novembre 1923. — Présidence de M. Bethenod.

Théorie du récepteur téléphonique. — M. Bethenod a exposé que le problème du téléphone haut parleur comporte de nombreuses solutions.

Par exemple, dans l'appareil Brown, la palette vibrante actionne un diffuseur conique Pathé, type phonographe, et donne au son une forte intensité.

Dans l'appareil Gaumont, une bobine très légère vibre comme une membrane dans l'entrefer d'un électroaimant très puissant ; cet appareil a une période propre de l'ordre de 50 à 100 p.s.

L'effet exercé sur l'air à l'intérieur de l'appareil est très puissant, mais l'air extérieur n'est ébranlé qu'au travers d'ouvertures très petites, ce qui diminue considérablement le volume du son et l'effet utile est finalement du même ordre que dans l'appareil Brown, malgré le moindre rendement de son appareil moteur.

Etudiant ensuite l'équation différentielle qui donne le déplace-

ment du centre de la membrane en fonction du courant téléphonique, M. Bethenod a montré l'influence des dimensions des organes et insisté sur la dispersion magnétique dont le rôle, très important et que l'expérience met en évidence, n'a pas encore reçu d'explication précise.

Le flux utile est maximum pour une certaine valeur de la réluctance de fuite qui correspond à la dispersion optimum.

L'influence des fuites a été reconnue pratiquement par Seibt et M. Bethenod l'a vérifiée expérimentalement.

M. Courtois a remarqué que la raideur de la membrane intervient comme 3^e variable.

Sur une question de M. Abraham relative à l'appréciation du rendement des appareils, M. Reynaud Bonin a rappelé que le rendement acoustique a été étudié par King et a insisté sur la nécessité d'adopter une échelle de mesure établie suivant une loi logarithmique.

6^e SECTION. — *Recherches physiques. — Instruments de Mesure.*

Président : M. Pérot.

Séance du 10 novembre 1923. — M. Guy a rappelé sommairement la théorie de la relativité, en insistant surtout sur les points de vue qui intéressent particulièrement les électriciens.

A la suite de cet exposé, M. Brylinski a fait observer que Newton ne pouvait être tenu pour responsable de la notion de causalité à vitesse infinie, car il a dit, non pas : « les corps s'attirent, etc... », mais « tout se passe comme si les corps s'attiraient, etc... ». Ce sont ses successeurs qui ont supprimé la réserve faite par lui.

En outre, les expériences dont on prétend tirer la fausseté du principe de l'addition des vitesses ont été expliquées indépendamment de toute idée de relativité et l'expérience de Michelson ne se prête pas aux interprétations trop simples qui en ont été données jusqu'à présent.

M. Brylinski a demandé en outre qu'on expose clairement les postulats qui, de l'aveu d'Einstein, constituent la seule base de sa théorie.

L'indépendance entre la vitesse de la lumière et celle d'une source mobile qui la produit, paraît confirmée par certaines observations, mais reste contestée par M. Sagnac. De plus, la vitesse

supplémentaire due au mouvement de la source, si elle existe dans son voisinage, pourrait s'amortir en route, car l'éther, dont l'existence n'est pas encore définitivement condamnée, ne peut être infiniment élastique, sans quoi la vitesse de la lumière serait infinie.

M. Pérot a répondu que la théorie de la relativité est la première qui ait permis d'expliquer le déplacement du périhélie de Mercure et de la déviation des rayons lumineux au voisinage du soleil.

Pour pouvoir l'écarter, il serait nécessaire de lui en substituer une autre expliquant d'une manière aussi satisfaisante les faits observés, mais rien n'a, jusqu'ici, établi sans conteste l'exactitude de la théorie d'Einstein.

M. Janet a rappelé en terminant que, vers 1885, Saussure fils avait fait paraître sur les êtres à deux dimensions un article où il faisait remarquer, entre autres conséquences, qu'une goutte de liquide s'étalant dans un plan leur paraîtrait avoir les propriétés d'un gaz.

VII. — RAPPEL DES PRINCIPALES DÉCISIONS PRISES AU COURS DE L'ANNÉE 1923 PAR LE BUREAU, LE COMITÉ ET L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS.

Comité du 23 mars 1923

Le Comité décide d'accorder aux membres de la Société accomplissant leur service militaire, et sur leur demande, une réduction de 50 pour 100 de leur cotisation, et une réduction de 100 pour 100 s'ils renoncent au service du Bulletin.

Assemblée générale du 11 avril 1923

L'assemblée générale élit comme présidents d'honneur :

M. Appell, membre de l'Institut, docteur de l'Université de Paris, et M. le général Ferrié, membre de l'Institut.

Elle crée un poste de délégué général permanent de la Société française des Electriciens.

Comité du 20 juin 1923

Le Comité décide de porter à 3 000 fr le montant des frais d'études à l'Ecole supérieure d'Electricité.

Il décide de fixer au premier samedi du mois, 17 heures, le jour

et l'heure des séances pendant la saison d'hiver seulement. Pendant l'été, les séances auront lieu comme par le passé, soit le premier mercredi du mois, à 20 h 30.

Comité du 19 décembre 1923

Affectation des legs en 1923 (voir page 751).

Organisation d'essais contrôlés d'appareils d'appel de T. S. F. pouvant être utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie (voir page 751).

ÉCHOS DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

Réunion à Del Monte, Californie, du 2 au 5 octobre 1923.

Cette réunion avait groupé 252 membres.

Séances techniques. — Les principaux sujets traités ont été les suivants:

- 1° Lignes de transport à haute tension (construction).
7 communications.
- 2° Généralités sur les distributions et les stations de production.
10 communications.
- 3° Construction et régulation des machines.
4 communications.
- 4° Gros appareillage.
3 communications.
- 5° Transformateurs.
2 communications.
- 6° Téléphonie, signalisation.
3 communications.

Les principales de ces communications seront reproduites dans le Journal de l'American Institute ou dans les Transactions.

Invitation de la Tchéco-Slovaquie. — Les délégués de l'Association des Electriciens tchécoslovaques ont invité leurs collègues américains à se rendre à Prague, au mois de juillet 1925, à l'occasion d'une exposition d'électricité qu'accompagneront diverses manifestations intéressantes.

Remise de la médaille Edison. — Au banquet de clôture de cette réunion, dont les attractions, sportives et autres, ne l'avaient cédé en rien aux travaux techniques, le président sortant, M. Jewett, retenu à New-York, annonça par téléphonie sans fil que la médaille Edison avait été attribuée, en 1923, au docteur Millikan, physicien éminent, dont il rappela les principaux travaux.

Le docteur Millikan, dans sa réponse, se demanda pourquoi une Association d'ingénieurs avait choisi, pour lui décerner cette médaille, un adepte de la science pure; et il proposa à son auditoire l'explication suivante :

Les grandes découvertes scientifiques, telles que celle de Copernic sur le système du monde et les découvertes modernes sur

la radioactivité sur la constitution et sur la désintégration de la matière modifient profondément, non seulement la mentalité du savant, mais aussi celle de l'homme de la rue, comme disent les Anglo-Saxons pour désigner celui que nous appelons M. Tout-le-Monde.

Celui-ci prend, en effet, une connaissance plus claire du monde extérieur et des moyens dont il dispose pour réagir sur lui.

C'est pourquoi chacun des grands pas faits par la science pure marque une nouvelle étape de la civilisation.

Réunion des directeurs le 26 octobre 1923. — Sur les présentations faites par le Comité d'examen, il a été procédé aux élections et aux promotions intérieures.

Ont été admis : 258 étudiants; élus: 161 associés, 5 membres ; promus : 8 associés au grade de membre, 2 membres au grade de Fellow.

Conférence des superréseaux. — Les délégués de dix des Etats de l'Union ont donné leur approbation au programme proposé par le secrétaire Hoover, pour l'étude des conditions techniques et des conditions légales d'interconnexion des réseaux sur le territoire des Etats-Unis.

Legs pour l'école électrotechnique de Philadelphie. — M. Moore vient de laisser 1 million et demi pour grouper en une école indépendante, placée sous la haute direction de l'Université de Philadelphie, les cours d'électrotechnique assurés directement jusqu'ici par cette Université.

Les bâtiments scolaires existant déjà, les revenus du legs seront consacrés à développer l'instruction électrotechnique préparatoire et à encourager les travaux de recherches entrepris par les professeurs et par les étudiants.

Le premier doyen désigné est M. Pender, qui a été le collaborateur de Rowland, et qui a consacré, en France, un séjour de plusieurs mois à des travaux scientifiques.

La rentrée d'octobre 1923 s'est faite avec 110 élèves.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

Journal de décembre 1923. — Le Journal de décembre est en entier consacré à la reproduction des adresses inaugurales prononcées au siège de l'Institution et dans les principaux groupes locaux.

On y trouve une mise au point brossée à grands traits des principales questions d'électrotechnique à l'ordre du jour.

Les sections de notre Société s'intéressant à la plupart des questions soulevées, sinon à toutes, nous pensons qu'il ne sera pas inutile de donner ici un résumé sommaire de ces adresses présidentielles.

Au siège social, le président entrant, M. Russell, universellement connu par ses nombreux travaux sur l'électrotechnique, et en particulier sur les courants alternatifs, a rappelé d'abord les diverses formes d'activité de l'Institution et le développement qu'il n'hésite pas à qualifier de phénoménal, du nombre de ses membres.

Passant ensuite une revue rapide des progrès réalisés depuis la guerre dans toutes les branches de la science et de l'industrie électriques, il s'est étendu plus longuement sur les phénomènes d'électricité atmosphérique, pour présenter la synthèse des résultats acquis en météorologie au cours des vingt-cinq dernières années.

D'après le Bureau météorologique de Grande-Bretagne, la température tombe à -53° lorsqu'on s'élève verticalement jusqu'à 10 km, limite de la troposphère. Au-delà, d'après les résultats obtenus par les ballons sondes, elle reste constante jusqu'à une hauteur de 70 km. Cette couche extérieure, qu'on appelle la stratosphère, est sèche, ce qui explique l'absence de chutes de neige au sommet de l'Everest.

Le gradient de potentiel à la surface du sol est souvent, en plein été, de l'ordre de 300 volts par mètre, et d'une valeur double au cœur de l'hiver ; par temps de brouillard, il dépasse parfois 1 500 volts par mètre.

La différence de potentiel totale entre la couche extérieure de la troposphère et le sol est de l'ordre d'un million de volts ; dans le stratosphère, le gradient s'annule, en sorte que cette couche, qui est isotherme, est aussi équipotentielle.

La différence de potentiel nécessaire pour déterminer le jaillissement d'un éclair paraît être de plusieurs milliards de volts ⁽¹⁾ ; elle serait donc très supérieure à la valeur maxima dans la troposphère.

(1) Les Américains estiment que cette valeur est de l'ordre de 3 millions de volts seulement. (N. D. L. R.)

Francis Donalds a, au milieu du siècle dernier, observé que l'électrification de l'atmosphère présente deux maxima diurnes: un le matin et l'autre l'après-midi. D'après Chree, ces maxima sont surtout marqués par temps froid, ce qui a conduit à penser qu'ils pouvaient être dus à la fumée ou aux autres impuretés de l'atmosphère. La résistance diélectrique de l'air, lorsque la température à la surface du sol est de 15° C et la pression barométrique de 760 mm, tombe de 28 000 à 2 100 volts par centimètre quand on s'élève à 12 km.

Il est probable que, vers 40 km, la résistance diélectrique de l'air passe par un minimum, puis qu'elle augmente de nouveau rapidement, pour atteindre au moins 30 fois la valeur qu'elle avait au niveau du sol.

On peut déduire cette conclusion d'une expérience de Hayden (J. A. I. E. E. 1922, p. 853), d'après laquelle le gradient de potentiel amenant la rupture diélectrique de l'air en vase clos est de 47 630 volts par centimètre à la pression atmosphérique, et de 1 235 000 volts dans un vide suffisant.

En considérant qu'une différence de potentiel de deux millions de volts suffit à faire franchir à l'étincelle dans l'air une distance de l'ordre du mètre, on est amené à attribuer l'énorme valeur signalée plus haut à la différence de potentiel qui détermine le jaillissement de l'éclair.

D'autre part, des expériences de laboratoire montrent que la résistivité du brouillard est supérieure à celle de l'air sec, mais que leur résistance disruptive est pratiquement égale.

M. Russell propose ensuite l'explication suivante du mécanisme de l'orage.

Un orage qui se déplace engendre une quantité prodigieuse d'énergie et fonctionne comme une machine électrostatique actionnée par un moteur très puissant.

Les aviateurs ont observé qu'au centre d'un nuage orageux l'air est animé d'un mouvement ascensionnel très rapide.

Dans les couches supérieures de la troposphère, il y a, en raison de l'ionisation, un nombre souvent élevé d'électrons libres.

Si l'humidité du courant d'air vertical est assez grande, la vapeur d'eau se condense autour de ces électrons; l'air se remplit de petits globules d'eau qui se réunissent pour former de grosses gouttes.

dent, M. Eschwège; M. Brylinski, Président du Comité d'organisation de l'Exposition; MM. Lemenand, Marsat, Routin, qui se sont chargés du soin de guider les groupes de visiteurs dans l'Exposition, et les exposants qui se sont rendus à leur stand, malgré l'heure matinale, pour fournir à nos membres toutes les explications désirables.

M. le Professeur Pérot, notre Vice-Président, a répété devant nous ses remarquables expériences sur la mesure du champ magnétique; M. le Commandant Mesny nous a fait constater, sur une distance de quelques mètres, la distance des nœuds et des ventres de ses ondes courtes; M. Chaumat nous a expliqué le principe de son wattmètre; M. Claude nous a fait une étourdissante conférence sur l'air liquide et a jonglé sous nos yeux avec ses composants, puis il nous a montré, en chambre noire, les objets éclairés comme à la lumière du jour par la synthèse des rayonnements de la lampe au mercure et de la lampe au néon; M. Soulier a fait valser son œuf d'autruche sous l'action des champs tournants; M. Lemoine a répété ses très curieuses expériences sur le gyroscope et sur les mouvements giratoires, tandis que, à ses côtés, M. Sosnowski nous faisait apercevoir les périodes critiques par lesquelles passe à vitesses croissantes la rotation d'un arbre flexible; M. Guillet nous a exposé les richesses de son laboratoire et notamment un très intéressant dilatomètre enregistreur qui trace une courbe où se révèlent les changements d'état d'un métal à mesure que la température s'élève; M. Bethenod nous a montré les vénérables appareils de son exposition rétrospective, à laquelle il avait consacré tant de soins et de peines.

Parmi les industriels qui ont apporté le plus grand empressement à nous documenter, nous citerons MM. Parsons, Lartigue, de Saint-Germain, de la Compagnie française Thomson-Houston, qui nous ont montré leurs appareils de signalisation, leurs redresseurs, leurs lampes, leurs échantillons de quartz d'une transparence étonnante, leurs transformateurs, leurs soupapes électrolytiques, leurs téléphones automatiques, pendant que M. Magunna nous faisait les honneurs des appareils construits par la Compagnie générale Electrique de Nancy.

MM. Bitterli et Legros, de la Compagnie générale d'Electricité, nous ont présenté les isolateurs à chaînes des Ateliers de Delle,

les moteurs des Ateliers d'Orléans, et des pièces fabriquées par la Manufacture d'Isolants en cégéite, lactolite, etc., matières protéiformes auxquelles recourent constructeurs et exploitants pour résoudre avec sécurité les innombrables problèmes que pose l'inéluctable nécessité d'isoler les conducteurs.

MM. Grandjean et Goldschmidt, de la Compagnie générale d'Entreprises électriques, ont présenté en même temps que les régulateurs Cuénod, le poste extérieur de coupure à 150 000 volts qui, de l'avis de M. le Ministre des Travaux publics, a constitué le clou de l'Exposition.

Au stand de la Société industrielle des Téléphones, MM. Vallée et Carrier ont détaillé leurs installations de téléphonie automatique et leurs nouveaux modèles d'appareillage. M. Varangot nous a présenté les lampes d'éclairage et les lampes pour T. S. F. fabriquées par la Compagnie générale des Lampes, et quelques-uns d'entre nous, trop rares malheureusement, ont pu suivre l'histoire de la lampe à incandescence en parcourant l'exposition de modèles, dont le premier remonte à 1841.

M. Gindre a exposé les importants avantages de sa pile à dépoliarisation par l'air.

M. Pomey, le très distingué Directeur de l'Ecole des Postes et Télégraphes, a bien voulu faire mettre en œuvre devant nos yeux les méthodes d'essai des appareils téléphoniques, la manœuvre des appareils Baudot dotés de leurs derniers perfectionnements et celle des récepteurs de T. S. F. transmettant en Morse.

M. Eschwège nous a conduits au stand de la Société A.P.E.L., où nous avons cru retrouver ces fées bienfaisantes qui, il y a bien longtemps, réalisaient d'un coup de baguette les vœux à peine formulés des pauvres humains.

Nous avons examiné, avec le plus vif intérêt, dans le stand des Forges et Ateliers de Jeumont, le câble à trois conducteurs sous une même enveloppe, destiné à fonctionner sous la tension de 60 000 volts entre phases. L'annonce des résultats obtenus grâce aux procédés de fabrication appliqués dans la confection de ce câble venait de faire sensation à la Conférence internationale des grands Réseaux à très haute tension.

Devant le stand de la Bakélite, nous avons pu nous rendre compte des emplois innombrables et de la souplesse d'application de cette matière isolante.

A la Compagnie de Radiotélégraphie, nous avons remarqué la consommation extrêmement faible des nouvelles lampes.

M. Belin a répété devant nous ses remarquables expériences de transmission des images; grâce à ses procédés si ingénieux les dépêches en toutes langues sont régulièrement transmises de Paris à Lyon et de Paris à Strasbourg, sans qu'il y ait lieu de craindre aucune erreur de lecture.

Au stand de l'Office de M. Léauté, nous avons constaté l'extraordinaire exiguité des tubes à mercure permettant de couper sous haute tension des intensités notables sans qu'il en résulte aucune altération de la surface du mercure, grâce au gaz inerte qui remplit le tube.

M. Gaiffe nous a montré son poste de radiothérapie fonctionnant sous 250 000 volts et produisant, grâce au tube Coolidge, des rayons si pénétrants que la lutte victorieuse contre le cancer peut dès maintenant être envisagée, et que les vacuoles occluses au sein des masses métalliques sont décelées par ces radiations qui ne connaissent pas d'obstacles.

Il faudrait, pour mentionner seulement toutes les installations intéressantes qu'abritait le hall du Grand-Palais, y consacrer entièrement tous les bulletins de l'année. Nous nous bornerons donc à renouveler nos plus vifs remerciements aux organisateurs de cette entreprise si complètement réussie et à tous les exposants qui ont bien voulu nous consacrer, à trois reprises, une part de leur temps si précieux.

VI. — TRAVAUX DES SECTIONS (1)

1^{re} SECTION. — *Production de l'Electricité*. Président : M. Roth.

Séance du 3 octobre 1923. — Spécification des machines. — La Section a entendu un exposé de M. Darrieus sur la question de savoir si la spécification des machines électriques doit être établie sur le régime continu ou sur le régime avec surcharges.

M. Darrieus rappelle que la substitution de la température ambiante de 30° C à celle de 40° C, admise jusqu'ici par les constructeurs français reviendrait à autoriser des échauffements de 10° supérieurs. L'expérience des constructeurs les a amenés à recon-

(1) Tout membre de la Société française des Electriciens peut, en adressant une demande au Délégué général, 14, rue de Staël, être convoqué aux séances des Sections.

naître que la spécification à régime continu sans surcharge ou à régime thermiquement équivalent aux régimes avec surcharges est la plus simple et la plus naturelle ; il paraît d'ailleurs très arbitraire de chercher à représenter par un régime schématique quelconque avec surcharge les régimes infiniment variés qu'impose la pratique.

De plus, si l'on considère les échauffements des différentes parties d'une machine, on est conduit à les représenter par trois courbes exponentielles au moins, qui se différencient nettement au début de la surcharge ; l'analyse du phénomène exigera donc, en général, la considération d'au moins six constantes arbitraires et des calculs assez complexes.

M. Darrius conclut en proposant le maintien de la spécification d'après le régime continu et la Section s'est rangée à cet avis.

Séance du 5 novembre 1923. — Adoption de fascicules de l'Union des Syndicats d'Electricité. — La Section a examiné et approuvé les trois fascicules ci-après, établis par l'Union des Syndicats d'Electricité et sur lesquels le Comité électrotechnique Français avait demandé l'avis de la Société française des Electriciens :

131 *ter.* — Modifications aux règles françaises d'unification.

2^e partie. — Conditions auxquelles doit satisfaire une machine électrique.

131 *quater.* — Modifications aux règles françaises d'unification. Définition des régimes et services des machines électriques.

182. — Règles complémentaires d'unification. Normalisation des transformateurs.

Coefficient de déformation des courbes d'alternateurs. — L'ordre du jour appelait ensuite, sur une suggestion de M. Legros, la recherche d'une méthode pour la détermination du coefficient de déformation des courbes d'alternateurs.

La méthode indiquée par le Comité électrotechnique Français a conduit à des désaccords considérables entre les constructeurs qui l'ont appliquée.

M. Legros attribue ces erreurs à la difficulté des lectures graphiques et des travaux de planimétrie.

M. de Pistoye a signalé que les erreurs dues à la fréquence élevée de certains harmoniques sont atténuées quand l'alternateur est conduit à une vitesse réduite.

M. Drouin a proposé d'opérer d'abord sur des courbes construi-

tes en superposant des courbes harmoniques connues, puis sur des courbes oscillographiques réelles.

M. Bethenod a exprimé l'avis que les courbes à analyser pourraient être obtenues artificiellement par superposition des courbes de plusieurs alternateurs mécaniquement accouplés.

M. Roth a bien voulu se charger de préparer des courbes et de les répartir entre les intéressés en indiquant à chacun d'eux la méthode de calcul à suivre.

Etude des isolants utilisés dans les machines. — La Section a estimé que, parallèlement à l'étude poursuivie par l'Union des Syndicats de l'Electricité sur les isolants synthétiques en général, elle pourrait entreprendre une étude qu'elle restreindrait aux seuls isolants employés dans les machines.

Les constructeurs qui ont déjà effectué des essais seront donc invités à les faire contrôler par le Laboratoire central d'Electricité et à en adresser les résultats au président de la première Section.

2^e SECTION. — *Eclairage.* Président : M. Lebaupin.

Séance du 20 novembre 1923. — Cahier des charges pour la fourniture des lampes d'automobiles. — L'accord n'a pu se faire avec la Chambre syndicale des Fabricants d'accessoires d'automobiles sur le texte qui avait été accepté par sa Section des lampes. Notamment cette Chambre n'admet pas la substitution immédiate de la spécification des lampes en lumens à l'ancienne spécification en bougies, bien que l'adoption de la nouvelle unité ait été consacrée par la loi du 2 avril 1919 et par le décret du 26 juillet 1919 ; elle persiste, en outre, à imposer l'essai au choc que les fabricants de lampes déclarent ne pouvoir accepter.

La 2^e Section a décidé de procéder à des essais sur les lampes de fabrications étrangères avant d'arrêter les conditions à inscrire au cahier des charges dont elle proposera l'homologation à l'Union des Syndicats d'Electricité.

Cahier des charges pour lampes à milieu gazeux. — Le texte définitif de ce cahier des charges, complété par les diagrammes à 6 limites et par le tableau des tolérances, sera présenté à l'une des prochaines séances de la deuxième Section.

Legs Cheux. — La Section a émis le vœu que ce legs lui soit attribué par la Société française des Electriciens, pour lui permettre de déterminer le coefficient d'éclairement intérieur des immeu-

bles (quotient de l'éclairement à l'extérieur par l'éclairement à l'intérieur des diverses pièces).

Eclairage des locaux industriels. — Des expériences pratiques seront entreprises pour déterminer l'éclairement minimum permettant de voir nettement les marches d'un escalier.

3^e SECTION. — *Electrochimie, électrometallurgie.*

Président : M. Bunet.

Séance du 15 novembre 1923. — M. Ribaud, de l'Institut de Physique de Strasbourg, était venu à Paris pour prendre part à la discussion, en Section, de sa communication faite à la séance publique de novembre sur les fours à haute fréquence.

Répondant aux nombreuses questions posées par les métallurgistes présents, il a exposé l'état actuel des applications industrielles du chauffage à haute fréquence. Ces installations, dont la puissance atteint parfois 105 kw et dont le rendement est élevé, commencent à se répandre aux Etats-Unis.

En France, il n'existe pas encore d'installations industrielles. Celle réalisée par M. Ribaud, d'une puissance de 75 kw seulement, est destinée aux recherches sur les produits réfractaires et sur les très hautes températures.

Les conditions électriques varient avec le problème industriel posé et doivent être étudiées pour chaque cas particulier.

En principe, la fréquence doit toujours être supérieure à 10 000 p.s. Les condensateurs peuvent être d'un type quelconque. Le transformateur doit présenter un coefficient de sécurité suffisant pour résister aux surtensions qui sont fréquentes.

Le réglage de la température se fait d'une manière très souple en agissant sur la vitesse de l'éclateur.

M. Bunet maintient les questions suivantes à l'ordre du jour de la 3^e Section :

- 1^o Etude générale des fours électriques.
- 2^o Electrometallurgie du fer.
- 3^o Electrolyse de l'eau.

Il est fait appel aux spécialistes pour obtenir une documentation complète sur la première question.

Au sujet de l'électrometallurgie du fer, M. Bunet rappelle que les électriciens recherchent un métal à faible hystérésis. Or, le fer

électrolytique à 99,7 pour 100 de fer possède une hystérésis élevée due à l'hydrogène occlus qu'il est très difficile d'éliminer, même par une fusion prolongée dans le vide.

4^e SECTION. — *Distribution. Traction.* Président: M. Parodi.

Présidents des Sous-Sections :

Appareillage : M. Darrieus.

Canalisations : M. Barillot.

Traction : M. Pèridier.

Examen de fascicules de l'Union des Syndicats d'Electricité. — La Section a examiné les fascicules ci-après transmis pour avis à la Société française des Electriciens par le Comité électrotechnique français.

N° 168. — Règles de normalisation du gros appareillage électrique.

N° 181. — Règles de normalisation des appareils de chauffage électrique.

N° 185. — Normalisation des intensités de courant pour l'appareillage électrique.

N° 186. — Cahier des charges pour la fourniture des conducteurs isolés en caoutchouc.

N° 188. — Cahier des charges pour la fourniture des câbles sous plomb isolés au papier imprégné.

Au sujet du fascicule N° 168, M. Girault a demandé que les règles d'échauffement limite qui y sont prévues ne soient pas applicables aux contacteurs et rupteurs électromagnétiques et électropneumatiques, ni aux combineurs à contacts mobiles et à surface cylindrique, mais qu'il soit établi des règles particulières pour ce matériel.

La Section a décidé de transmettre ces réserves au Comité électrotechnique français et d'adopter les autres fascicules.

Redresseurs à vapeur de mercure. — Dans l'attente d'une communication sur ce sujet promise par M. Maurice Leblanc, la Section a exprimé le vœu qu'il lui soit apporté une mise au point complète de la question, tirée des publications faites dans les périodiques. Il est fait appel aux membres de la Société auxquels leurs études habituelles faciliteraient ce travail.

Discussion sur les méthodes de calcul des lignes à haute tension.

— Sur l'invitation de M. le président, M. Lachaise fit ressortir les différences présentées par l'abaque de miss Clarke avec les abaques similaires, notamment avec celui de M. Blondel.

L'abaque de Clarke, comme cela est aussi parfaitement réalisable avec l'abaque Blondel, matérialise un diagramme au moyen de rapporteurs et de réglettes graduées mobiles. Son emploi s'étend jusqu'aux lignes de 650 km, c'est-à-dire jusqu'à des longueurs dépassant celles usitées en Europe.

De même que dans l'abaque Blondel, une des variables est le rapport des puissances reçues au carré des tensions à l'extrémité réceptrice.

Mais l'emploi de l'abaque Blondel exige du calculateur la connaissance des imaginaires, ainsi que le calcul préalable de l'impédance caractéristique vectorielle et de la constante linéique de propagation, tandis qu'un employé quelconque peut être mis rapidement à même de se servir de l'abaque de Clarke. Le président fit ressortir que l'usage fait par miss Clarke du principe de similitude permet d'éliminer une variable dans le nombre assez grand de celles que le problème comporte : les variables conservées sont des quantités physiques, résistance, longueur de la ligne, etc... Les erreurs commises apparaissent donc immédiatement.

L'abaque de Clarke donne des résultats précis pour les lignes de 200 à 300 km, alors que pour ces distances l'abaque Blondel, sous sa forme commerciale, nécessite des interpolations qui sont des causes d'erreurs appréciables.

L'abaque de Clarke permet de calculer un très grand nombre de points, ce qui est précieux pour obtenir, par approximations successives, la répartition des puissance active et réactive dans un réseau complexe.

Il fait ressortir en outre, de façon tangible, l'influence des différentes variables et permet de résoudre graphiquement un grand nombre de problèmes dont la solution serait inextricable par le calcul.

La General Electric Co a étudié les divers régimes de fonctionnement sur le réseau électrique de l'Orléans, par approximations successives et en utilisant les courbes de l'abaque de Clarke.

L'étude d'un régime de fonctionnement demandait trois jours de travail à trois opérateurs.

Le problème se pose de la même manière pour le réseau national de France.

Le président a exprimé le vœu que les exploitants lui fassent connaître leur avis sur l'intérêt particulier présenté par l'emploi de l'abaque de Clarke.

M. Darrieus a fait observer que la concordance entre les courbes obtenues, d'une part, par la méthode approchée, et d'autre part, par la méthode exacte, est beaucoup plus satisfaisante si, au lieu des sous-stations elles-mêmes, on fait intervenir les intervalles entre les sous-stations.

M. Thielemans a rappelé la solution donnée par lui au problème de la répartition des charges par l'emploi de diagrammes où se lisent directement les valeurs des puissances active et réactive.

Sur l'invitation du président, M. Darrieus a rappelé les traits essentiels de l'étude qu'il a publiée dans le Bulletin de vacances.

Il fit ressortir notamment que l'on obtient plus de précision en traçant les cercles de pertes constantes qui ont tous leur centre commun sur l'épure, qu'en traçant les cercles d'égal rendement.

5^e SECTION. — *Télégraphie, Téléphonie.* Président : M. Langevin.

Président suppléant : M. Bethenod.

Séance du 7 novembre 1923. — Présidence de M. Bethenod.

Théorie du récepteur téléphonique. — M. Bethenod a exposé que le problème du téléphone haut parleur comporte de nombreuses solutions.

Par exemple, dans l'appareil Brown, la palette vibrante actionne un diffuseur conique Pathé, type phonographe, et donne au son une forte intensité.

Dans l'appareil Gaumont, une bobine très légère vibre comme une membrane dans l'entrefer d'un électroaimant très puissant ; cet appareil a une période propre de l'ordre de 50 à 100 p.s.

L'effet exercé sur l'air à l'intérieur de l'appareil est très puissant, mais l'air extérieur n'est ébranlé qu'au travers d'ouvertures très petites, ce qui diminue considérablement le volume du son et l'effet utile est finalement du même ordre que dans l'appareil Brown, malgré le moindre rendement de son appareil moteur.

Étudiant ensuite l'équation différentielle qui donne le déplace-

ment du centre de la membrane en fonction du courant téléphonique, M. Bethenod a montré l'influence des dimensions des organes et insisté sur la dispersion magnétique dont le rôle, très important et que l'expérience met en évidence, n'a pas encore reçu d'explication précise.

Le flux utile est maximum pour une certaine valeur de la réluctance de fuite qui correspond à la dispersion optimum.

L'influence des fuites a été reconnue pratiquement par Seibt et M. Bethenod l'a vérifiée expérimentalement.

M. Courtois a remarqué que la raideur de la membrane intervient comme 3^e variable.

Sur une question de M. Abraham relative à l'appréciation du rendement des appareils, M. Reynaud Bonin a rappelé que le rendement acoustique a été étudié par King et a insisté sur la nécessité d'adopter une échelle de mesure établie suivant une loi logarithmique.

6^e SECTION. — *Recherches physiques. — Instruments de Mesure.*

Président : M. Pérot.

Séance du 10 novembre 1923. — M. Guy a rappelé sommairement la théorie de la relativité, en insistant surtout sur les points de vue qui intéressent particulièrement les électriciens.

A la suite de cet exposé, M. Brylinski a fait observer que Newton ne pouvait être tenu pour responsable de la notion de causalité à vitesse infinie, car il a dit, non pas : « les corps s'attirent, etc... », mais « tout se passe comme si les corps s'attiraient, etc... ». Ce sont ses successeurs qui ont supprimé la réserve faite par lui.

En outre, les expériences dont on prétend tirer la fausseté du principe de l'addition des vitesses ont été expliquées indépendamment de toute idée de relativité et l'expérience de Michelson ne se prête pas aux interprétations trop simples qui en ont été données jusqu'à présent.

M. Brylinski a demandé en outre qu'on expose clairement les postulats qui, de l'aveu d'Einstein, constituent la seule base de sa théorie.

L'indépendance entre la vitesse de la lumière et celle d'une source mobile qui la produit, paraît confirmée par certaines observations, mais reste contestée par M. Sagnac. De plus, la vitesse

supplémentaire due au mouvement de la source, si elle existe dans son voisinage, pourrait s'amortir en route, car l'éther, dont l'existence n'est pas encore définitivement condamnée, ne peut être infiniment élastique, sans quoi la vitesse de la lumière serait infinie.

M. Pérot a répondu que la théorie de la relativité est la première qui ait permis d'expliquer le déplacement du périhélie de Mercure et de la déviation des rayons lumineux au voisinage du soleil.

Pour pouvoir l'écarter, il serait nécessaire de lui en substituer une autre expliquant d'une manière aussi satisfaisante les faits observés, mais rien n'a, jusqu'ici, établi sans conteste l'exactitude de la théorie d'Einstein.

M. Janet a rappelé en terminant que, vers 1885, Saussure fils avait fait paraître sur les êtres à deux dimensions un article où il faisait remarquer, entre autres conséquences, qu'une goutte de liquide s'étalant dans un plan leur paraîtrait avoir les propriétés d'un gaz.

VII. — RAPPEL DES PRINCIPALES DÉCISIONS PRISES AU COURS DE L'ANNÉE 1923 PAR LE BUREAU, LE COMITÉ ET L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS.

Comité du 23 mars 1923

Le Comité décide d'accorder aux membres de la Société accomplissant leur service militaire, et sur leur demande, une réduction de 50 pour 100 de leur cotisation, et une réduction de 100 pour 100 s'ils renoncent au service du Bulletin.

Assemblée générale du 11 avril 1923

L'assemblée générale élit comme présidents d'honneur :

M. Appell, membre de l'Institut, docteur de l'Université de Paris, et M. le général Ferrié, membre de l'Institut.

Elle crée un poste de délégué général permanent de la Société française des Electriciens.

Comité du 20 juin 1923

Le Comité décide de porter à 3 000 fr le montant des frais d'études à l'Ecole supérieure d'Electricité.

Il décide de fixer au premier samedi du mois, 17 heures, le jour

et l'heure des séances pendant la saison d'hiver seulement. Pendant l'été, les séances auront lieu comme par le passé, soit le premier mercredi du mois, à 20 h 30.

Comité du 19 décembre 1923

Affectation des legs en 1923 (voir page 751).

Organisation d'essais contrôlés d'appareils d'appel de T. S. F. pouvant être utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie (voir page 751).

ÉCHOS DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

Réunion à Del Monte, Californie, du 2 au 5 octobre 1923.

Cette réunion avait groupé 252 membres.

Séances techniques. — Les principaux sujets traités ont été les suivants :

- 1° Lignes de transport à haute tension (construction).
7 communications.
- 2° Généralités sur les distributions et les stations de production.
10 communications.
- 3° Construction et régulation des machines.
4 communications.
- 4° Gros appareillage.
3 communications.
- 5° Transformateurs.
2 communications.
- 6° Téléphonie, signalisation.
3 communications.

Les principales de ces communications seront reproduites dans le Journal de l'American Institute ou dans les Transactions.

Invitation de la Tchéco-Slovaquie. — Les délégués de l'Association des Electriciens tchécoslovaques ont invité leurs collègues américains à se rendre à Prague, au mois de juillet 1925, à l'occasion d'une exposition d'électricité qu'accompagneront diverses manifestations intéressantes.

Remise de la médaille Edison. — Au banquet de clôture de cette réunion, dont les attractions, sportives et autres, ne l'avaient cédé en rien aux travaux techniques, le président sortant, M. Jewett, retenu à New-York, annonça par téléphonie sans fil que la médaille Edison avait été attribuée, en 1923, au docteur Millikan, physicien éminent, dont il rappela les principaux travaux.

Le docteur Millikan, dans sa réponse, se demanda pourquoi une Association d'ingénieurs avait choisi, pour lui décerner cette médaille, un adepte de la science pure; et il proposa à son auditoire l'explication suivante :

Les grandes découvertes scientifiques, telles que celle de Copernic sur le système du monde et les découvertes modernes sur

la radioactivité sur la constitution et sur la désintégration de la matière modifient profondément, non seulement la mentalité du savant, mais aussi celle de l'homme de la rue, comme disent les Anglo-Saxons pour désigner celui que nous appelons M. Tout-le-Monde.

Celui-ci prend, en effet, une connaissance plus claire du monde extérieur et des moyens dont il dispose pour réagir sur lui.

C'est pourquoi chacun des grands pas faits par la science pure marque une nouvelle étape de la civilisation.

Réunion des directeurs. le 26 octobre 1923. — Sur les présentations faites par le Comité d'examen, il a été procédé aux élections et aux promotions intérieures.

Ont été admis : 258 étudiants; élus: 161 associés, 5 membres ; promus : 8 associés au grade de membre, 2 membres au grade de Fellow.

Conférence des superréseaux. — Les délégués de dix des Etats de l'Union ont donné leur approbation au programme proposé par le secrétaire Hoover, pour l'étude des conditions techniques et des conditions légales d'interconnexion des réseaux sur le territoire des Etats-Unis.

Legs pour l'école électrotechnique de Philadelphie. — M. Moore vient de laisser 1 million et demi pour grouper en une école indépendante, placée sous la haute direction de l'Université de Philadelphie, les cours d'électrotechnique assurés directement jusqu'ici par cette Université.

Les bâtiments scolaires existant déjà, les revenus du legs seront consacrés à développer l'instruction électrotechnique préparatoire et à encourager les travaux de recherches entrepris par les professeurs et par les étudiants.

Le premier doyen désigné est M. Pender, qui a été le collaborateur de Rowland, et qui a consacré, en France, un séjour de plusieurs mois à des travaux scientifiques.

La rentrée d'octobre 1923 s'est faite avec 140 élèves.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

Journal de décembre 1923. — Le Journal de décembre est en entier consacré à la reproduction des adresses inaugurales prononcées au siège de l'Institution et dans les principaux groupes locaux.

On y trouve une mise au point brossée à grands traits des principales questions d'électrotechnique à l'ordre du jour.

Les sections de notre Société s'intéressant à la plupart des questions soulevées, sinon à toutes, nous pensons qu'il ne sera pas inutile de donner ici un résumé sommaire de ces adresses présidentielles.

Au siège social, le président entrant, M. Russell, universellement connu par ses nombreux travaux sur l'électrotechnique, et en particulier sur les courants alternatifs, a rappelé d'abord les diverses formes d'activité de l'Institution et le développement qu'il n'hésite pas à qualifier de phénoménal, du nombre de ses membres.

Passant ensuite une revue rapide des progrès réalisés depuis la guerre dans toutes les branches de la science et de l'industrie électriques, il s'est étendu plus longuement sur les phénomènes d'électricité atmosphérique, pour présenter la synthèse des résultats acquis en météorologie au cours des vingt-cinq dernières années.

D'après le Bureau météorologique de Grande-Bretagne, la température tombe à -53° lorsqu'on s'élève verticalement jusqu'à 10 km, limite de la troposphère. Au-delà, d'après les résultats obtenus par les ballons sondes, elle reste constante jusqu'à une hauteur de 70 km. Cette couche extérieure, qu'on appelle la stratosphère, est sèche, ce qui explique l'absence de chutes de neige au sommet de l'Everest.

Le gradient de potentiel à la surface du sol est souvent, en plein été, de l'ordre de 300 volts par mètre, et d'une valeur double au cœur de l'hiver ; par temps de brouillard, il dépasse parfois 1 500 volts par mètre.

La différence de potentiel totale entre la couche extérieure de la troposphère et le sol est de l'ordre d'un million de volts ; dans le stratosphère, le gradient s'annule, en sorte que cette couche, qui est isotherme, est aussi équipotentielle.

La différence de potentiel nécessaire pour déterminer le jaillissement d'un éclair paraît être de plusieurs milliards de volts ⁽¹⁾ ; elle serait donc très supérieure à la valeur maxima dans la troposphère.

(1) Les Américains estiment que cette valeur est de l'ordre de 3 millions de volts seulement. (N. D. L. R.)

Francis Ronalds a, au milieu du siècle dernier, observé que l'électrification de l'atmosphère présente deux maxima diurnes: un le matin et l'autre l'après-midi. D'après Chree, ces maxima sont surtout marqués par temps froid, ce qui a conduit à penser qu'ils pouvaient être dus à la fumée ou aux autres impuretés de l'atmosphère. La résistance diélectrique de l'air, lorsque la température à la surface du sol est de 15° C et la pression barométrique de 760 mm, tombe de 28 000 à 2 100 volts par centimètre quand on s'élève à 12 km.

Il est probable que, vers 40 km, la résistance diélectrique de l'air passe par un minimum, puis qu'elle augmente de nouveau rapidement, pour atteindre au moins 30 fois la valeur qu'elle avait au niveau du sol.

On peut déduire cette conclusion d'une expérience de Hayden (J. A. I. E. E. 1922, p. 853), d'après laquelle le gradient de potentiel amenant la rupture diélectrique de l'air en vase clos est de 47 000 volts par centimètre à la pression atmosphérique, et de 1 235 000 volts dans un vide suffisant.

En considérant qu'une différence de potentiel de deux millions de volts suffit à faire franchir à l'étincelle dans l'air une distance de l'ordre du mètre, on est amené à attribuer l'énorme valeur signalée plus haut à la différence de potentiel qui détermine le jaillissement de l'éclair.

D'autre part, des expériences de laboratoire montrent que la résistivité du brouillard est supérieure à celle de l'air sec, mais que leur résistance disruptive est pratiquement égale.

M. Russell propose ensuite l'explication suivante du mécanisme de l'orage.

Un orage qui se déplace engendre une quantité prodigieuse d'énergie et fonctionne comme une machine électrostatique actionnée par un moteur très puissant.

Les aviateurs ont observé qu'au centre d'un nuage orageux l'air est animé d'un mouvement ascensionnel très rapide.

Dans les couches supérieures de la troposphère, il y a, en raison de l'ionisation, un nombre souvent élevé d'électrons libres.

Si l'humidité du courant d'air vertical est assez grande, la vapeur d'eau se condense autour de ces électrons; l'air se remplit de petits globules d'eau qui se réunissent pour former de grosses gouttes.

Quand la vitesse du déplacement vertical de l'air dépasse 8 m par seconde, ces grosses gouttes se pulvérisent en gouttes plus fines. L'expérience montre que ces dernières sont en général chargées négativement, alors que les plus grosses le sont positivement. Celles-ci sont soumises à des oscillations verticales, du fait des fluctuations dans la vitesse du courant d'air ; elles gèlent et fondent alternativement, donnant naissance à la grêle. Les grosses gouttes et les grains de grêle sont donc, quand ils tombent, chargés positivement.

L'énergie électrique, produite en partie par le travail de la pesanteur sur les gouttes qui tombent et en partie par celui du courant d'air ascendant sur les gouttes qui montent, s'emmagasiné dans l'atmosphère.

La surface supérieure du nuage se charge négativement et sa surface inférieure positivement.

Les gouttes qui tombent élèvent la différence de potentiel jusqu'à la valeur où l'éclair jaillit.

Si l'on admet que le câble soit ainsi bipolaire, on s'explique les décharges en aigrette ou en nappe, que l'on observe quelquefois les soirs d'été, entre la face supérieure d'un nuage et les couches d'air plus conductrices placées au-dessus.

On s'explique également que des éclairs jaillissent entre un nuage et un autre qui passe au-dessus ou au-dessous du premier ou entre lui et le sol.

Il est encore possible d'observer une mise en court-circuit des deux pôles du nuage par un éclair qui le contourne.

Il a été récemment annoncé que la charge électrique prise par les gouttes de pluie au moment de leur pulvérisation par le courant d'air ascendant est, en général, d'autant plus grande que l'eau est plus pure. Cet effet est particulièrement marqué en ce qui concerne la teneur en chlorure de sodium, ce qui peut avoir pour effet de diminuer l'intensité des orages au bord de la mer.

La question de la protection des bâtiments et des appareils intéresse plus particulièrement les ingénieurs.

Les principes établis par sir Oliver Lodge devant l'Institution en 1889 ont été adoptés par le Royal Institute of British architects; ils donnent pleine satisfaction.

Bien qu'une décharge atmosphérique se produise dans un sens unique, elle peut déterminer la production de courants alternatifs

dans les conducteurs du paratonnerre. On a observé, en effet, que des fils isolés étaient brisés en menus fragments par un coup de foudre, ce qui paraît révéler l'action de courants à alternances rapides.

Le président se demande si l'on n'attache pas trop d'importance à obtenir une faible résistance de terre.

Ayant été amené à découvrir une prise de terre qui présentait une résistance de 70 ohms, il constata que la plaque de terre était constituée par une brique placée là depuis vingt ans. Le paratonnerre avait cependant fonctionné d'une manière pleinement satisfaisante.

Il considère qu'il serait très désirable d'enregistrer régulièrement les phénomènes les plus curieux observés sur les décharges atmosphériques et notamment les cas de foudre globulaire.

Il rappelle que Faraday ne croyait pas à l'existence réelle de cette dernière.

Il est d'un avis nettement opposé, en se basant tant sur son expérience personnelle que sur des observations faites dans des conditions qui ne laissent aucune place au doute.

Il croit en trouver une explication dans la production d'une décharge en aigrette à l'extrémité d'une colonne d'air de conductibilité plus élevée que celle de l'air environnant. Mais il ne voit pas clairement comment, si cette explication est exacte, cette colonne conductrice peut, après avoir cheminé dans l'intérieur des bâtiments, fournir encore assez d'énergie au globe qui la termine pour produire par son explosion des dommages aussi importants que ceux qui sont souvent constatés.

Passant ensuite aux phénomènes de réflexion ou de réfraction des ondes hertziennes, qui peuvent expliquer que ces ondes suivent la surface de la terre jusqu'à en faire le tour complet, il remarque que les ondes lumineuses ne diffèrent des ondes hertziennes que par leur longueur et qu'elles doivent, par suite, s'infléchir comme elles.

A l'appui de cette opinion, il cite une observation faite le 2 mai 1923, par le colonel Neame et par M. Smythe, ingénieur électrique, au cours d'une ascension au Finsteraarhorn, dans l'Oberland Bernois.

La visibilité était exceptionnelle. Etant à l'altitude de 1 000 m environ, ils aperçurent, dans la direction du Nord, la forêt Noire,

à une distance de 240 km, et au Sud les sommets neigeux des Alpes italiennes, situés à plus de 160 km. Le colonel déclare même avoir vu, à 11,55 h, un vapeur dans la direction de la Manche, dont il était éloigné de 650 km ; quelques minutes après, il vit, un peu plus à l'Est, cinq vaisseaux dont il put, dit-il, distinguer les cheminées et les mâts.

A l'altitude où se trouvaient les observateurs, remarque le conférencier, l'horizon visible n'était qu'à 225 km : un mirage à cette distance doit être un phénomène très rare. Le fait ne paraît donc pouvoir être expliqué que par la réfraction des ondes lumineuses dans les couches de l'atmosphère, comme il arrive pour les ondes hertziennes.

En terminant, M. Russell énonce les deux théorèmes suivants dont la démonstration mathématique est donnée pages 9 à 18 du Journal :

1° Le coefficient d'inductance par unité de longueur du courant passant dans un cylindre par rapport au courant passant dans un autre cylindre parallèle au premier n'est pas réciproquement égal pour le second.

On ne peut donc pas admettre l'existence d'un coefficient mutuel d'inductance entre deux cylindres parallèles de longueur infinie.

Dans le cas de deux conducteurs concentriques, il n'y a de coefficient d'inductance mutuelle que si les axes coïncident.

2° L'emplacement à fixer pour une station centrale dont les centres d'utilisation sont donnés, quand on cherche à réduire au minimum le cuivre des feeders pour une perte donnée, est celui pour lequel le courant pris à un des points d'utilisation est égal ou supérieur à la somme des courants pris aux autres points.

Cet emplacement ne coïncide pas avec le centre de gravité des charges.

Il rappelle ensuite les méthodes classiques de détermination des harmoniques d'une f.e.m. alternative, méthode d'Armagnat par résonances et méthode graphique d'analyse des oscillogrammes.

Il indique une méthode simplifiée permettant de trouver le 3^e harmonique et de déterminer la force électromotrice efficace de l'onde fondamentale en relevant la longueur de onze ordonnées de l'oscillogramme.

Il montre que les valeurs ainsi trouvées suffisent pour faire rejeter certaines courbes comme mauvaises.

Il écarte comme pratiquement inapplicable l'évaluation du facteur harmonique défini par la valeur

$$\frac{|E_3 + E_5 + \dots|^{1/2}}{E_1},$$

E_1 , E_3 , E_5 étant les amplitudes des harmoniques ; il rejette de même l'évaluation du facteur de déviation défini comme étant le quotient de la différence maximum entre les ordonnées d'une courbe et les ordonnées correspondantes de la courbe sinusoïdale équivalente de même longueur d'onde, par l'ordonnée maximum de la courbe sinusoïdale, les deux courbes étant superposées de manière à rendre cette différence maximum aussi petite que possible.

Dans le cas où aucune méthode graphique n'est applicable, il conseille de recourir à la méthode de résonance qu'il souhaite de voir standardiser.

Enfin, il revient sur la notion qu'il a introduite (*Faraday House Journal*, 1922, p. 73) du facteur d'équilibre dans un réseau polyphasé, dont la connaissance, jointe à celle du facteur de puissance dans le même réseau, permet de reconnaître si une fourniture d'énergie donnée est de nature à améliorer ou à empirer les conditions de la distribution.

Il établit les théorèmes qui l'ont conduit à cette notion.

Groupe de l'Ouest, à Cardiff. — M. Allan, président, a parlé de la situation sociale des ingénieurs anglais. Il leur a conseillé, en termes assez vifs, d'une part de compléter leur éducation par l'acquisition de connaissances commerciales et juridiques ; d'autre part, de se faire mieux apprécier du grand public et de la grande presse qui les ignorent, et de ne plus dédaigner une réclame raisonnable dans ce but.

Cette réclame, il l'aperçoit surtout dans une part plus importante à prendre aux discussions techniques et dans les rapports plus fréquents à entretenir avec la presse « laïque ».

Il a constaté, en passant, que le seul organisme existant qui fût à même d'apprécier la valeur technique des ingénieurs électriciens était le Comité d'examen de l'*Institution of Electrical Engineers*.

Groupe Nord-Est, à Newcastle. — Le président Thomas Carter

a prononcé une allocution philosophique et économique de haute tenue, qu'il avait intitulée : « méditations de route ». En passant, il se plaignit lui aussi du rôle trop effacé que jouent les ingénieurs dans les affaires publiques ; il les engagea à prendre, avant de s'engager dans leur carrière, l'avis de personnes expérimentées ; à s'efforcer, au cours des discussions, d'adopter le point de vue de leurs contradicteurs ; à conserver, enfin, au cours de leur vie d'affaires, une bienveillante égalité d'humeur.

Groupe de la Mersey (Liverpool). — Le président Hollingsworth s'est principalement occupé des perfectionnements apportés aux chaudières, aux turbines et aux condenseurs.

Il a toutefois exposé quelques considérations sur les récents progrès réalisés dans les alternateurs et dans l'appareillage.

La solidité mécanique et la solidité électrique des machines ont été augmentées et la ventilation améliorée, surtout dans les groupes tournant à 3 000 tours par minute, et dont le rotor est long et mince.

On a aussi renforcé les attaches des bobines du rotor et des connexions terminales du stator, qui résistent mieux ainsi aux efforts mécaniques des court-circuits.

Les recherches faites sur la relation entre la durée des isolants et la température ont conduit à accepter des limites de température plus élevées.

Le refroidissement par circulation d'eau, qui augmente la puissance disponible, a cependant fait peu de progrès, surtout dans les stators.

La méthode la plus employée actuellement est celle de la ventilation à travers un filtre, sec ou humide. Malheureusement, les meilleurs filtres laissent encore passer un poids considérable de poussière, ce qui a amené à développer la ventilation à circuit fermé ; l'air se refroidit dans un réfrigérant à surface, traversé par l'eau de condensation ou par l'eau de refroidissement.

Le premier système a l'avantage de procurer une récupération des chaleurs perdues dans l'alternateur.

Les risques d'incendie sont réduits au minimum, la proportion d'oxygène dans l'air confiné tombant rapidement au-dessous de celle qui est indispensable pour entretenir la combustion.

L'appareillage des stations centrales est en voie de transformation presque constante, devant faire face à des tensions et à des

capacités de rupture toujours croissantes ; ces dernières sont particulièrement importantes dans le cas d'interconnexion des réseaux ou des centrales.

Souvent, on intercale, pour limiter l'intensité des court-circuits, des bobines de réactance dans les barres de connexion. La pratique consistant à réunir l'alternateur et le transformateur élévateur, qui constituent alors un ensemble, le disjoncteur étant placé sur la haute tension, a aussi imposé des perfectionnements aux disjoncteurs. Il existe, en Angleterre, des appareils construits pour couper 1 500 000 kva sous 33 000 volts.

Généralement, on place le transformateur et le disjoncteur dans un bâtiment séparé qui, pour 33 000 volts, doit avoir des dimensions considérables.

Les disjoncteurs sont manœuvrés du poste central par l'intermédiaire d'un moteur ou, plus généralement, d'un solénoïde.

Dans la plupart des stations anglaises, les disjoncteurs sont enfermés dans des cabines de maçonnerie, la protection contre les arcs étant obtenue en laissant de grands espaces d'air autour des pièces sous tension.

Cependant, le type de disjoncteurs en espace clos rempli de matière isolante rencontre beaucoup de faveur. Il offre l'avantage d'une grande robustesse et d'une économie d'encombrement; mais il est moins facile d'accès.

On n'a pas encore pu, en raison de la sévérité des prescriptions administratives, constituer, comme on le fait aux Etats-Unis et sur le continent, des postes extérieurs.

La même cause a amené un développement plus important qu'ailleurs des dispositifs de localisation des défauts dans les installations.

La nécessité de manœuvrer électriquement les disjoncteurs a développé les systèmes de contrôle destinés à indiquer à tous moments les conditions de service où se trouve l'installation, tant pour les unités génératrices que pour les disjoncteurs.

En ce qui concerne le rendement des installations, le chiffre maximum de 18 pour 100 indiqué par la commission d'électricité comme n'ayant pas été dépassé en 1922, pour le rendement thermique total, est assez désappointant.

Parmi les centrales qui ont atteint ce maximum, on en relève qui travaillent à une pression de vapeur relativement basse, et

avec un facteur de charge médiocre, résultat qui ne paraît pas être en faveur des stations à très hautes pressions de vapeur.

Le rendement thermique n'est pas, en effet, le seul facteur qui intervienne ; le coût de premier établissement et les frais d'entretien augmentent avec l'importance de l'installation.

Certaines centrales américaines obtiendraient un rendement total de 28,5 pour 100 avec une pression de vapeur qui doit atteindre 81 atmosphères.

Les perfectionnements en cours peuvent faire espérer d'obtenir bientôt le kilowatt-heure avec une dépense de 570 g de charbon même médiocre.

Groupe du Nord Midland, à Leeds. — Le major Bell, président, a souligné les progrès considérables réalisés en 1922 par l'industrie électrique de Grande-Bretagne. La production totale des centrales est en progrès de 17,5 pour 100 sur celle de l'année précédente.

L'augmentation de puissance installée atteint 400 000 kilowatts.

Il y a actuellement, en Grande-Bretagne, trois installations produisant par an plus de 200 millions de kilowatts-heure et six autres dépassent 100 millions de kilowatts-heure.

Les efforts de la commission chargée d'unifier les tensions d'exploitation ont eu un résultat appréciable. La tension de 33 000 volts est considérée comme une tension type ; elle a été adoptée par huit entreprises en 1922-1923.

Il existe d'ailleurs une distribution par câbles souterrains fonctionnant à 66 000 volts. En somme, l'industrie électrique du Royaume-Uni a échappé à la dépression générale.

Il y a toutefois une exception : les tramways électriques sont de plus en plus abandonnés. Il est vrai qu'ils avaient fait peu de progrès depuis vingt ans, et que leur exploitation encombre les villes.

Il est probable que l'électrobus à trolley est appelé à les remplacer.

Par contre, l'électrification des chemins de fer de banlieue et même de grande ligne est en progrès.

Groupe d'Ecosse, à Glasgow. — Le président Mitchell a examiné les développements actuellement possibles de l'énergie électrique. Il a remarqué que la ville de Glasgow, avec sa consommation de 130 kilowatts-heure par tête et par an, est bien en retard

sur Chicago, où la consommation correspondante a atteint, en 1922, 700 kilowatts-heure. Toutefois, à Glasgow, la consommation des derniers mois de 1923 a été à peu près la même que celle de 1920-1921, dernière année prospère. Le conférencier conseille donc aux producteurs de prévoir un nouvel accroissement de la demande.

L'action de la commission d'électricité, exercée par l'intermédiaire d'autorités locales dans les districts, amènera lentement, mais sûrement, la fermeture des petites centrales, et la concentration de la production dans de grandes centrales munies de tous les perfectionnements et mieux placées pour l'approvisionnement d'eau et de combustible.

Le facteur de charge sera amélioré et les frais d'exploitation seront fort abaissés.

L'interconnexion générale des centrales est le système le meilleur au point de vue du rendement ; elle s'imposerait si on pouvait faire fond entièrement sur les dispositifs automatiques de protection.

Mais il est impossible de supprimer complètement les court-circuits entre phases, dont les effets deviennent désastreux. Le rétablissement du service, après une avarie grave, est difficile dans un système à interconnexion complète.

L'emploi des réactances pour limiter les courants de court-circuit a été recommandé, mais ces appareils sont coûteux et encombrants, et à peu près impraticables dans les distributions à 25 p.s.

A Glasgow, on a reconnu par expérience que les disjoncteurs à huile des sous-stations pouvaient couper le courant de court-circuit tant que la puissance sur les barres omnibus ne dépassait pas 60 000 kw.

L'amélioration du facteur de charge s'est révélée de toute première importance, alors qu'après la guerre tout avait contribué à l'abaisser.

Il y a donc intérêt à développer les applications domestiques qui augmentent la consommation en dehors des heures de pointe : c'est surtout une question de tarifs.

Il y aurait lieu aussi pour amener les abonnés à louer non seulement des appareils, mais même des installations intérieures, de donner des conférences de démonstration auxquelles les habitants seraient conviés par des circulaires.

A Glasgow, une exposition d'applications domestiques amena en trois semaines la location de 258 foyers et de 52 cuiseurs. Les emplois de l'électricité autres que l'éclairage augmentent la consommation domestique de 8 à 30 fois suivant les villes.

Sous-groupe de Dundee. — M. Christie, président, a fait l'histoire des systèmes de mesure, depuis l'âge préhistorique jusqu'aux récentes conventions internationales qui ont consacré l'adoption du système C. G. S.

Il a parlé avec le respect convenable des mesures anglaises, mais il a cité, sans y ajouter de commentaires, la dure appréciation de lord Kelvin sur ce système « absurde, ridicule, fait pour perdre le temps et user le cerveau des Britanniques », et il a terminé en exprimant le vœu que ce système de mesures soit « perfectionné » le plus tôt qu'il sera possible.

Section de T. S. F. — Le président Shaughnessy s'est félicité de la constitution de la British Broadcasting C^o, qui a monopolisé en Grande-Bretagne les transmissions par téléphonie sans fil et haut-parleurs. Les résultats techniques obtenus n'auraient pu l'être si plusieurs sociétés concurrentes s'en étaient occupées ensemble.

Les triodes réceptrices ont été assez perfectionnées pour pouvoir être placées entre toutes les mains.

La durée des triodes transmettrices a été augmentée.

Ainsi, dans une station émettrice comprenant dix triodes, dix-huit de ces appareils ont été remplacés en 1921, après un travail effectif de 450 heures ; en 1922, cinq l'ont été au bout de 1 000 heures ; en 1923, trois seulement l'ont été, et après 3 000 heures.

Certaines triodes à anode refroidie par l'eau donnent un débit de 10 kw avec 10 000 volts sur l'anode. Un essai de surcharge a permis de leur faire donner 14 kw à 12 500 volts.

La soupape Holweck, à refroidissement par eau, et facilement démontable, donne 8 kw d'énergie oscillante pour 10 kw consommés à 5 000 volts.

L'Amirauté a mis en service des valves type silica à 12 000 volts sur l'anode, débitant 21 kw pour 33 kw consommés.

Le conférencier a donné ensuite des détails circonstanciés sur la station de Leafield, notamment sur les harmoniques produits à la transmission et sur leurs causes.

Sections techniques. — Le Journal de décembre reproduit la

liste des membres appartenant aux diverses sections. Celles-ci sont réparties comme suit :

- 1° Production. Eclairage.
- 2° Electricité dans les mines.
- 3° Traction.
- 4° Electrochimie et électrométallurgie.
- 5° Télégraphes et téléphones.

L'Institution est représentée par un ou plusieurs de ses membres dans quarante comités, conférences ou institutions diverses, parmi lesquelles figurent, en France, la Conférence des grands Réseaux et la Conférence des Poids et Mesures.

ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Le Bulletin de décembre donne les « *normes pour les tensions et pour les essais d'isolement* », adoptées par l'Association.

SOCIÉTÉ BELGE DES ELECTRICIENS

Le Bulletin de novembre contient, avec un mémoire de M. Piérrard sur le « Calcul de la résistance équivalente d'un réseau » ; le rapport du président, M. Bède, sur l'activité de la Société en 1922-1923.

Il a été tenu huit séances, au cours desquelles ont été traités les sujets suivants :

« Projet de l'Etat belge en matière de réseaux téléphoniques », par M. Bocquet ;

« Radiotélégraphie intercontinentale », par le commandant Berger ;

« Rôle thérapeutique du radium », par le docteur Bayet ;

« Les centrales électriques thermiques », par M. Léon Gérard ;

« Les disjoncteurs automatiques », par M. Rommel ;

« L'accélérographe électrique », par M. Bradfer ;

« Projet d'un canal Liège-Campine avec centrale hydroélectrique », par M. le colonel Fontaine.

Le président rappelle ensuite dans son rapport les réceptions échangées au cours de l'année 1923 entre la Société des Ingénieurs civils de France et la Société belge des Electriciens ; la conférence

faite par M. Gillon à la Société française des Electriciens, et il annonce que le général Ferrié a bien voulu lui promettre de venir faire une conférence à Bruxelles.

Il annonce enfin la prochaine constitution de sections d'études analogues à celles de la Société française.

Le même Bulletin contient le résumé des travaux de nos sections.

Nous exprimons ici à M. le président Béde notre reconnaissance pour avoir fait cette publication qui, dans notre esprit, est le début d'une collaboration toujours plus étroite avec la Société belge.

BIBLIOGRAPHIE

Les Forces hydrauliques et les Usines hydroélectriques, par Etienne Pacoret. — Un vol. 20 cm × 13 cm, de XI-451 pages, 239 figures. — Librairie Delagrave, Paris, 1923.

L'ouvrage de M. Pacoret est divisé en trois parties consacrées : la première à l'aménagement hydraulique des cours d'eau, la seconde à la production et à la transmission de l'Energie électrique, la troisième à l'utilisation de l'Energie électrique. Etant donné l'ampleur du sujet traité, l'ouvrage de M. Pacoret n'a comme but que de vulgariser les connaissances qui sont à la base de la science hydroélectrique et de faire apprécier le rôle de premier plan que joue, dans notre industrie nationale, l'utilisation de nos forces hydrauliques.

Leçons d'optique physiologique, professées à l'Institut d'optique théorique et appliquée, par le Dr André Broca, professeur de physique à la Faculté de Médecine, Membre de l'Académie de Médecine. — Un vol. 23 cm × 16 cm, 151 pages, 86 fig. — Paris, Edition de la Revue d'optique théorique, 1923.

Les questions d'éclairage préoccupent de plus en plus les électriciens; l'activité de notre 2^e Section en est une preuve. Mais il est difficile de s'occuper de ces questions sans bien connaître l'outil auquel on s'adresse. Malheureusement, les questions d'optique physiologique n'ont guère été traitées jusqu'ici que dans des ouvrages destinés particulièrement aux médecins ou elles sont éparses au milieu d'autres sujets et dans des conditions telles que les problèmes qui intéressent surtout l'éclairagiste n'ont pu être traités avec l'ampleur nécessaire. L'ouvrage du docteur Broca vient donc combler une lacune. Nous attirons particulièrement l'attention du lecteur sur les paragraphes relatifs à la photométrie et sur le dernier chapitre : « Utilisation par l'œil des sources industrielles », où l'auteur reprend les recherches qu'il fit jadis en collaboration avec M. Laporte au Laboratoire central d'Electricité.

Le chapitre relatif à l'étude des lumières brèves sera lu aussi avec beaucoup d'intérêt par tous les électriciens constructeurs de phares.

Nous ne pouvons que remercier l'auteur d'avoir publié les leçons qu'il a faites à l'Institut d'optique et souhaiter le plus brillant succès à son ouvrage.

Les Instruments d'optique, par H. Pariselle, professeur à la Faculté des Sciences de Lille. — Un vol. 18 cm × 11 cm, de VI-218 pages (82 fig.). — (« Collection Armand Colin », n° 26. — Paris, Armand Colin, 1923.

Après un exposé des propriétés générales (lentilles, miroirs, œil), l'auteur décrit les instruments d'optique (objectifs photographiques, télescopes, lunettes diverses, microscopes, etc.) tels qu'ils sont construits. Tout en évitant les développements mathématiques, il fait comprendre, point par point, pour quelles raisons ils sont ainsi. Ouvrage destiné aux élèves de spéciales, aux étudiants et à tous ceux qui désirent s'instruire sur les perfectionnements des instruments d'optique modernes.

La protection des réseaux et des installations électriques contre les surtensions, par Capart. Préface de M. Barbillion (2^e édition). — Un vol. 25 cm × 16 cm, 223 pages. — Paris, Dunod, 1923.

L'ouvrage de M. Capart reste le plus complet des traités publiés jusqu'à ce jour en français sur la question des surtensions. Une introduction théorique et une documentation pratique étendue mettent bien en évidence la signification de

la résistance caractéristique $\sqrt{\frac{L}{C}}$ des lignes, ainsi que l'infériorité foncière de principe de tous les appareils de protection comportant une distance explosive, et l'efficacité spéciale des condensateurs à l'égard des fronts d'onde raides, et des phénomènes à haute fréquence.

Une bibliographie très complète qui, malheureusement, s'arrête à 1914, mentionne les publications les plus importantes et notamment tous les mémoires fondamentaux antérieurs à cette date.

La T. S. F. des amateurs, par F. Duroquier (6^e édition, revue, mise à jour et complétée). — Un vol. 18 cm × 11 cm, de XII-386 pages (369 fig.). — Paris, Masson et Cie, 1923.

C'est l'ouvrage par excellence de l'amateur. Celui-ci y trouvera des conseils pré-

cieux qui lui permettront de recevoir les nombreux postes qui émettent chaque jour des communications téléphoniques. Du reste, le seul fait que cet ouvrage en soit à sa 6^e édition, montre d'une façon évidente le succès qu'il a obtenu dans le public auquel il s'adresse.

Longueurs d'onde et propagation, par M. Vieillard, capitaine du génie. — Un vol. 25 cm × 16 cm, de XII-416 pages. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921.

L'ouvrage du capitaine Vieillard diffère de beaucoup d'ouvrages similaires sur la radiotélégraphie, par ce fait que c'est un ouvrage absolument personnel. L'auteur, laissant de côté les dispositifs de production et de réception des ondes, ne s'occupe que de ce qu'il appelle la « T. S. F. extérieure ».

La première partie, qui contient quatre chapitres, est consacrée à l'étude des antennes, la deuxième à la propagation. Tous ceux qui s'intéressent à la construction des postes radiotélégraphiques liront avec intérêt cet ouvrage, dans lequel aucune question importante n'a été omise. Certes, des connaissances mathématiques assez étendues sont nécessaires pour aborder la lecture de ce livre, mais ces connaissances ne dépassent pas celles que doit posséder tout ingénieur radiotélégraphiste.

Nous pensons pouvoir prédire un brillant succès à l'ouvrage du capitaine Vieillard.

Etude de quelques problèmes de radiotélégraphie, par H. de Bellescize. — Un vol. 25 cm × 16 cm, de VIII-174 pages. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, éditeurs, 1920.

L'éminent ingénieur radiotélégraphiste qu'est M. de Bellescize a rassemblé dans cet ouvrage un certain nombre de notes sur divers problèmes relatifs à l'émission des ondes radiotélégraphiques, à leur propagation, à leur réception.

C'est ainsi qu'on trouvera successivement dans cet ouvrage des études sur le rayonnement des antennes, sur le rendement des postes à étincelles, sur les appareils de réception, sur l'utilisation de la formule d'Austin et la sécurité des communications, sur la compensation des cadres, sur l'influence des pylônes.

Toutes les questions traitées le sont avec la plus extrême vigueur et tous ceux qui connaissent les brillants résultats obtenus par M. de Bellescize, en particulier dans l'organisation du poste de réception de la marine à Basse-Lande, voudront profiter de ses travaux.

La Radiotéléphonie (Emission, Réception, Montages de postes d'amateurs, Applications), par Carlo Toché, ancien élève de l'Ecole polytechnique, capitaine du génie breveté, ancien officier radiotélégraphiste au grand quartier général. Préface du général Ferrié, Membre de l'Institut — Deuxième édition, revue et augmentée. — Un vol. 25 cm × 16 cm, de VIII-120 pages (51 fig.) — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923.

Ce livre est un ouvrage technique; il est pourtant écrit de façon à pouvoir être lu même par ceux qui n'ont que des connaissances élémentaires en électricité. En outre, les amateurs y trouveront de précieux conseils. Peut-être emporté par son sujet, l'auteur prévoit-il un avenir trop large à la radiotéléphonie, d'où certaines réserves faites par le général Ferrié dans sa préface. Mais ces restrictions n'ôtent pas ses mérites à cet ouvrage, dont nous ne saurions trop recommander la lecture à tous ceux qu'intéressent les applications des ondes hertziennes.

L'Azote (Encyclopédie Léauté), par L. Hackspill, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg. — Un vol. 19 cm × 13 cm. — Paris, Masson et Cie, 1923.

Après avoir rappelé le rôle de l'azote dans la vie des êtres organisés, l'auteur donne très rapidement les divers procédés de synthèse des nitrures et des cyanures, procédés qui sont restés jusqu'ici dans le domaine des essais semi-industriels.

Les chapitres suivants renferment, après d'utiles considérations théoriques sur la synthèse de l'ammoniaque, une description très détaillée des usines d'Oppau et de Mersebourg sur lesquelles l'auteur, à l'occasion d'une mission de contrôle en Allemagne, a pu recueillir des renseignements personnels du plus haut intérêt.

Vient ensuite la synthèse électrique des oxydes de l'azote; il est regrettable que le cadre un peu étroit de l'ouvrage n'ait pas permis à l'auteur de développer davantage ce chapitre qui intéresse plus particulièrement les électriciens.

Une étude comparée du prix de revient des divers procédés, suivie d'une sta-

istique de la production et de la consommation de l'azote, constituent la dernière partie de l'ouvrage, une des plus intéressantes en raison de l'importance que présente au point de vue national le problème de la fixation de l'azote.

La Chimie et la Guerre. Science et Avenir (Collection « Les Leçons de la Guerre »), par Ch. Moureu, de l'Académie des Sciences, professeur au Collège de France. — Un vol. 20 cm × 14 cm, de 384 pages. — Paris, Masson et Cie, 1920.

Ce livre est un peu loin des préoccupations ordinaires des Electriciens. Il mérite cependant d'être signalé à tous ceux qui s'occupent de technique et de questions industrielles. L'auteur, avec sa haute compétence, examine les grands problèmes que la guerre a posés, notamment la nécessité de la production de substances que, jusque-là, nous ne fabriquions pas, ou seulement en quantités négligeables devant les nécessités du moment. Le livre contient encore une très intéressante partie sur le recrutement et la formation des ingénieurs et des chimistes, sur la recherche scientifique, son utilité et son organisation, sur la collaboration des savants et des industriels. La dernière partie, sur les Eléments et Conditions de la grandeur nationale renferme des considérations et développements dont la lecture est du plus haut intérêt pour tous.

La Relativité vraie et la Gravitation universelle, par Georges Fournier, ingénieur des Arts et Manufactures. — Un vol. 23 cm × 14 cm, de VIII-130 pages. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923.

Ouvrage de 130 pages où l'auteur expose ses idées personnelles sur le sujet. Il cite de nombreux auteurs et formule des critiques très sévères. L'auteur n'admet pas les idées relativistes, ni même les géométries de Riemann ou Lovat-chewski, le « postulat » d'Euclide étant un « axiome » pour lui. L'auteur propose une explication du déplacement séculaire du périhélie de Mercure : malgré des développements très subtils utilisant les mathématiques, il réussit à rester compréhensible, non seulement pour les professeurs de sciences, mais aussi pour les ingénieurs, les élèves des grandes écoles et même ceux qui n'ont suivi qu'un cours de préparation à celles-ci.

Appareils de mesures électriques, par M. Chirac, ingénieur electricien (E. S. E.). — (« Bibliothèque professionnelle Baillière »). — Un vol. 17 cm × 11 cm, de 332 pages, 206 fig. — Paris, Baillière, 1923.

Le but de cet ouvrage est de fournir aux ouvriers qui construisent les appareils de mesures, les connaissances techniques suffisantes pour leur permettre de comprendre leur travail et, par conséquent, d'y apporter plus d'intérêt : mais l'auteur se propose aussi d'expliquer, à ceux qui s'en servent, les conditions d'emploi, les précautions et les soins particuliers aux instruments les plus courants.

Ce volume comporte trois parties : le rappel des notions générales d'électricité, sur lesquelles repose la théorie des mesures; la description des instruments usuels et l'indication des méthodes classiques; enfin, des notions sur les matériaux et les procédés employés pour la construction des appareils. Cette dernière partie, quoique sommairement traitée, constitue le point original de l'ouvrage. — A. G.

Théorie cinétique des gaz, par Eugène Bloch (« Collection Armand Colin », n° 7). — Un vol. 18 cm × 11 cm, de 176 pages, 7 fig. — Paris, Armand Colin, 1923.

Le livre de M. Eugène Bloch présente au lecteur, sous une forme didactique très heureuse, la théorie cinétique des gaz d'après les travaux les plus récents. L'étude si curieuse des fluctuations, celles des gaz très raréfiés et de la largeur des raies spectrales en terminent l'exposé clair et précis. Nous félicitons l'auteur d'avoir rejeté les calculs dans des notes placées à la fin de l'ouvrage, de manière à ne pas détourner l'esprit du lecteur de la théorie cinétique elle-même.

Cours de résistance des matériaux appliqués aux machines, professé à l'Ecole spéciale de Physique et de Chimie de la Ville de Paris, par Georges Bayle, ingénieur des Arts et Métiers, professeur de Physique et Chimie de la Ville de Paris. — Quatrième édition, revue et augmentée. — Un vol. 25 cm × 16 cm, de 468 pages, 363 fig. — Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1922.

Cet ouvrage est la reproduction du cours professé par M. Bayle à l'Ecole spéciale des Travaux publics, du Bâtiment et de l'Industrie. Il fait suite à d'autres

cours et nécessaire, pour être compris, comme le fait remarquer l'auteur dans sa préface, la connaissance du cours de statique graphique.

C'est un ouvrage très complet, illustré de nombreux exemples numériques, qui pourra rendre de grands services aux constructeurs de machines. En dépit de son titre, il pourra aussi être utile aux constructeurs d'usines, qui trouveront au dernier chapitre des renseignements sur la stabilité des machines.

Congrès régional de l'Électrification des campagnes, compte rendu des travaux du Congrès de Montpellier, par R. Gouvret, ingénieur du génie rural. — Un vol. 14 cm x 16 cm, de 328 pages. — Montpellier, Imprimerie Fournier et Montane, 1923.

M. Gouvret rend compte des travaux du Congrès régional de l'Électrification des Campagnes, tenu à Montpellier les 7, 8, 9 et 10 juin 1923, ayant comme objet principal l'étude des réseaux ruraux.

Ces réseaux coûtent très cher et il faut réduire les dépenses de premier établissement et si on veut rendre leur réalisation possible. Dans la Note présentée au Congrès sur les « Modes économiques de construction des réseaux ruraux », M. Goussot montre que par un choix judicieux de la tension d'alimentation, du mode de construction et de l'écartement des supports, d'importantes économies pouvaient être réalisées.

M. Brissaud, dans sa note sur la « Tarification de l'Énergie électrique », rappelle que les tarifs à forfait, au compteur, à taxe fixe, peuvent être employés et il indique que la tarification au compteur avec taxe fixe paraît la plus rationnelle dans le cas des réseaux ruraux.

Les coopératives et les syndicats de communes sont étudiés dans deux rapports dus, le premier à M. Bloch, le second à M. Blanc.

L'état actuel de la production et de la distribution de l'Énergie électrique dans la région économique fait l'objet d'une étude de M. Masselin, et M. Pastre examine dans quelles conditions peut être envisagée l'électrification des campagnes par l'utilisation des ressources hydrauliques locales et la création d'usines génératrices thermiques.

Un problème national : l'Électrification générale du Territoire, par Charles Boileau. — Un vol. 23 cm x 14 cm, de 176 pages. — Paris, Imprimerie Tequi, 1923.

Dans ce petit ouvrage de 146 pages, l'auteur a rassemblé une documentation intéressante, bien que sommaire, sur les conditions générales de production d'énergie, l'interconnexion des usines, les lignes de transmission minimum et les lignes de distribution d'énergie. Dans les trois derniers chapitres consacrés aux réseaux de distributions et aux réseaux ruraux, l'auteur essaie d'indiquer les divers procédés de gestion des entreprises d'électricité et de tarification de l'énergie.

La Construction des bobinages électriques (aide-mémoire), par Clément. — 160 cm x 245 cm, de 202 pages. — Paris, Dunod, 1923.

Les problèmes qui se posent chaque jour au dessinateur du bureau d'études, au bobinier, à l'électricien assurant à lui seul tous les services d'une petite entreprise, exigent de leur part la connaissance des principes du bobinage et de la construction.

L'auteur les a exposés en les mettant à la portée de tous. De très nombreux tableaux et schémas illustrent l'ouvrage, en facilitent la compréhension et lui donnent une valeur pratique immédiate.

L'Évolution des étoiles, par Jean Bosler, directeur de l'Observatoire de Marseille.

Un vol. cartonné 24 cm x 16 cm, de 103 pages (avec figures). (Recueil des Conférences-rapports de documentation sur la physique, tome 8, 1^{re} série, conférences 19 et 20.) — Paris, Société « Journal de Physique ».

Après nous avoir indiqué comment les astronomes classent les étoiles, l'auteur nous apprend comment des recherches photométriques ou spectroscopiques permettent d'évaluer leur température. Dans le 2^e chapitre, il nous montre comment on a cherché à expliquer les particularités observées dans les spectres de ces étoiles en s'appuyant sur les découvertes de la physique moderne relatives au gaz ionisés.

Dans le chapitre III, nous apprenons comment on a pu mesurer les dimensions des étoiles et nous voyons exposées les hypothèses cosmogoniques auxquelles conduisent les observations mentionnées plus haut.

Nous y voyons que les recherches modernes semblent justifier les hypothèses un peu hasardées, lancées il y a plus de trente ans, par Sir Norman Lockyer.

Les 4^e et 5^e chapitres nous donnent des idées sur la constitution interne des planètes et sur les causes de leur température élevée.

Tous ceux qu'intéressent les problèmes parfois troublants de la constitution des mondes liront avec intérêt l'œuvre de M. Bosler.

Espace, temps, gravitation, par A.-E. Eddington, professeur d'Astronomie à l'Université de Cambridge. Ouvrage traduit de l'anglais par J. Rooshof, élève à l'École normale Supérieure, avec une introduction de P. Langevin, professeur au Collège de France. Un vol. 25 cm × 17 cm, de XII-262 et 119 pages. Paris, Librairie scientifique J. Hermann, 1921.

Nombreux sont les ouvrages de vulgarisation parus sur la théorie de la relativité. La plupart du temps, les auteurs consacrent la majeure partie de leur ouvrage à tenter de nous faire saisir ce que notre géométrie a de fictif et de conventionnel. Pour cela, ils reproduisent les arguments si bien exposés par H. Poincaré dans « Science et Hypothèses ». Puis viennent quelques mots sur la relativité restreinte ; et la relativité généralisée, il n'est pas le plus souvent question.

Le lecteur bienveillant et mal averti se figure qu'il est au courant de la théorie de la relativité, alors qu'on ne lui a même pas dit en quoi elle consiste.

Ce reproche ne s'adresse pas à l'ouvrage du savant astronome de Cambridge. Contrairement à ce que pourrait faire supposer le style des premières pages, ce n'est point un livre de vulgarisation, c'est un ouvrage préparatoire à l'étude des mémoires originaux.

Une certaine connaissance des mathématiques est du reste nécessaire pour sa lecture. Mais l'auteur sait admirablement graduer les difficultés, et ce n'est que très bien préparé que le lecteur aborde l'exposition des questions délicates. Dans un appendice de 150 pages est développée la théorie des tenseurs et son application à la relativité.

Dans le corps de l'ouvrage sont décrites en détail les fameuses observations faites par l'auteur à l'île des Princes, observations où il avait trouvé l'expérimentation concise de la théorie nouvelle.

Nous ne savons si tous ceux qui liront son ouvrage y gagneront la même conviction. Ils pourront du moins parler en connaissance de cause de la relativité.

Les Applications élémentaires des fonctions hyperboliques à la Science de l'Ingénieur Electricien, par A.-E. Kennelly, professeur d'Electricité appliquée à l'Université de Harvard, directeur des Recherches électriques appliquées au Massachusetts Institute of Technology, etc... Un volume 27 cm × 21 cm, de VIII-154 pages, avec 31 figures. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Désigné comme professeur américain d'échange, pendant l'année scolaire 1921-1922, l'auteur a exposé aux étudiants et élèves ingénieurs français les questions qu'il avait plus particulièrement étudiées ; il a notamment développé les propriétés des fonctions hyperboliques et examiné leur application à l'étude des lignes de transmission électrique.

C'est ce dernier sujet qu'il traite dans le petit ouvrage qui vient de paraître avec l'autorité et la compétence que de nombreuses publications antérieures attachent à son nom. Cependant, dédiant ce volume à ses collègues, amis et élèves français, le professeur Kennelly a tenu à adapter son exposé à l'esprit de ses lecteurs ; pour tous ceux qui le connaissent, il est superflu d'ajouter qu'il y a parfaitement réussi, servi qu'il était par sa connaissance subtile de notre langue et par sa pénétration de nos méthodes d'enseignement.

Pour justifier l'introduction des fonctions hyperboliques, l'auteur montre tout d'abord que de telles lignes trigonométriques entrent naturellement dans les expressions des différences de potentiel et des intensités, le long d'une ligne à courant continu, uniforme et de longueur indéfinie. En un point déterminé d'une ligne réelle, c'est-à-dire d'une longueur finie et alimentant un récepteur donné, ces mêmes quantités peuvent encore être traduites par une formule analogue, mais acceptant une expression plus simple, si l'on introduit une variable auxiliaire, dite angle de position, caractéristique du point considéré et de l'appareil récepteur. Ces formules s'étendent immédiatement aux lignes à courant alternatif, si l'on substitue aux termes algébriques des quantités vectorielles : ces

dernières sont d'ailleurs représentées par des nombres complexes, pour la commodité des calculs.

Ayant montré les similitudes que présentent les fonctions circulaires et hyperboliques, le professeur Kennelly en rappelle les propriétés essentielles, puis étend leur emploi aux angles complexes. Il a étudié ensuite les propriétés des lignes à courant alternatif et envisagé quelques cas intéressants, tel celui d'une ligne dite quart d'onde; il justifie l'adjonction d'impédances localisées dans les lignes téléphoniques à longue distance et montre sous quelles réserves une ligne artificielle reproduit, en régime permanent, les propriétés d'une ligne uniforme. Enfin, en quelques pages, il esquisse l'étude du régime transitoire, dans le cas simple d'ondes progressives.

Statique et Dynamique, par H. Béghin, professeur à l'Ecole Normale. 2 vol. in-16, avec figures. Paris, Armand Colin, éditeur, 1923.

L'ouvrage de M. Béghin est un exposé très bien fait des principes de la statique et de la dynamique. L'auteur, sortant des routes frayées, a su éviter l'écueil d'une trop grande abstraction qui dérouté les lecteurs encore novices. Il a su garder constamment le contact avec la réalité concrète, sans perdre pour cela en rien de la rigueur des raisonnements. Ce petit livre facilitera l'initiation de la mécanique à bien des étudiants et les ingénieurs désireux de rafraîchir leurs connaissances le liront aussi avec profit.

L'ouvrage est complété par un grand nombre d'exercices.

Eléments d'Electricité, par Charles Fabry, professeur à la Sorbonne. Un volume 17 cm x 11 cm, de VIII-498 pages, avec 70 figures. Paris, Collection Armand Colin (Section de Physique), 1922.

Exposer les lois fondamentales de l'électricité à des débutants est une tâche épineuse, car le lecteur sera rebuté par les développements de pure théorie et ne peut acquérir qu'une connaissance bien superficielle des phénomènes, s'ils lui sont présentés comme un ensemble de faits isolés.

Comme tous ceux qui le connaissent pouvaient le prévoir, M. Fabry a su éviter ces deux sortes d'écueil avec une rare élégance. Rattachant les phénomènes fondamentaux aux notions de puissance, de travail et d'énergie, il a, dès les premières pages, illustré son texte d'allusions aux applications industrielles les plus courantes. L'exposition est ainsi plus attrayante, mais surtout elle incite le lecteur à persévérer dans une étude dont il conçoit, dès l'abord, le vaste champ d'application. Ce petit ouvrage constitue une bonne introduction à des études plus complètes, mais intéresse aussi, par sa conception très personnelle, tous ceux qui touchent à l'enseignement de l'électricité.

Annales de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris et du Bureau central de Magnétisme terrestre, publiées par les soins de Ch. Maurain, professeur à la Faculté des Sciences de Paris, directeur de l'Institut de Physique du Globe et du Bureau central de Magnétisme terrestre : tome premier. Un vol. 31 cm x 24 cm, de 324 pages. Paris, Les Presses universitaires de France, 1923.

Créé par décret du 28 juillet 1921, l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris est chargé des recherches se rapportant au magnétisme terrestre, qui étaient effectuées auparavant par le Bureau central Météorologique. Retardée par la guerre, la dernière publication de ces observations avait trait à l'année 1914; le présent fascicule relate les mesures effectuées de 1915 à 1921, à la station du Val-Joyeux, située à Villepreux (Seine-et-Oise), et aux observatoires du Petit-Port à Mantes et d'Alger-Bouzaréa. La majeure partie de cet ouvrage est consacrée à des tableaux de résultats et à des graphiques. Quelques intéressantes notices permettent de mieux apprécier l'intérêt que présente cet ensemble des déterminations.

Après avoir fait l'historique des observations magnétiques en France, M. Ch. Maurain étudie les perturbations apportées par les lignes électriques voisines des observatoires; MM. F. Baldet et Ch. Duferri donnent des indications sur la précision des moyens qu'ils ont employés et commentent leurs observations respectives. Enfin, M. Alfred Angot, se basant sur les résultats de trente-neuf années consécutives, cherche à dégager les lois qui représentent les variations diurnes, annuelles et séculaires, du magnétisme terrestre à Paris.

Die Elektro-Metallofen, par E.-Fr. Russ, ingénieur en chef, Cologne. Un vol. 24 cm $\times$ 16 cm, de 161 pages, avec 123 figures et 23 tableaux. R. Oldenburg, Berlin et Munich, 1922.

Cet ouvrage traite essentiellement des procédés et des moyens pratiques pour fondre, par voie électrique, le cuivre et ses alliages.

Environ 1/10 du livre est consacré aux Généralités : applications de l'électricité, propriétés des Métaux, historique des dispositions de fusion.

Ensuite 1/10 du livre décrit les fours de fusion électriques et les avantages généraux de la fusion électrique.

Enfin, l'auteur décrit les divers moyens de production de chaleur par l'électricité (environ 1/10 de l'ouvrage) et divers genres de fours (environ 7/10 du livre).

L'auteur se défend d'avoir fait un livre définitif, étant donné la difficulté de se procurer des résultats d'exploitation industrielle, et il annonce une prochaine édition.

L'ouvrage est clairement rédigé; il contient des renseignements pratiques intéressants et consacre d'importants exposés, notamment aux procédés et moyens de fusion par induction, haute et basse fréquence.

La Houille blanche, par H. Cavaillès, professeur au lycée de Bordeaux. Un vol. 17 cm $\times$ 11 cm, de VI-215 pages avec 8 cartes et 4 figures. Paris, Armand-Colin, 1922.

Ce petit ouvrage, qui fait partie d'une collection de vulgarisation, est une étude plutôt géographique que technique de l'industrie hydroélectrique, d'un caractère élémentaire, mais d'une documentation abondante et sûre.

L'auteur, après avoir débuté en expliquant d'une façon très sommaire ce qu'est l'industrie de la houille blanche, dresse un tableau remarquablement complet de la répartition et de l'utilisation des eaux courantes, en France particulièrement et à l'étranger, et termine en comparant les chances d'avenir et les avantages respectifs de la houille blanche et de la houille noire.

Cinématique et Mécanisme, par R. Bricard, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers. Un volume in-16, avec figures. Paris, Librairie Armand Colin, 1923.

L'ouvrage de M. Bricard est une initiation, en deux cents pages, à l'étude de la Cinématique et des Mécanismes. L'exposé, d'une grande clarté et d'une simplicité remarquable, est accessible à tous ceux qui connaissent les premiers éléments de la géométrie et du calcul algébrique.

La moitié du livre est consacrée à l'étude des mécanismes : engrenages, cames, excentriques, systèmes articulés, faite à un point de vue très concret. Elle rendra les plus grands services à tous ceux qui doivent faire ensuite plus complètement de la mécanique appliquée.

IL Y A TRENTE ANS

Décembre 1893. — M. Claude fait une communication sur les moyens d'augmenter la sécurité des distributions des courants alternatifs à haute tension.

Ce moyen consiste à placer entre le conducteur et la terre une self-inductance en dérivation sur la capacité du conducteur et à les régler près de la condition de résonance.

L'ensemble donnera au conducteur un isolement d'autant plus grand que cette condition sera mieux réalisée, et si l'on vient à toucher le conducteur, la résistance du corps sera négligeable auprès de l'isolement apparent, le potentiel du conducteur s'annulera et après le temps très court nécessaire à l'établissement du nouveau régime, tout danger aura disparu.

Il en conclut que c'est aux câbles à courant continu à haute tension qu'il importe de donner un très fort isolement, alors que pour les câbles à courant alternatif à haute tension, l'isolement apparent en marche dû à la capacité est inférieur à l'isolement réel au repos, dès que celui-ci atteint un mégohm.

M. Arnoux, un peu sceptique, a réclamé une vérification expérimentale des résultats annoncés par M. Claude.

M. Hospitalier fait ensuite une conférence, avec de nombreuses projections, sur l'Industrie électrique en Amérique.

Table méthodique des matières

CONTENUES DANS LE TOME III (4^e SERIE).

CLASSIFICATION

- | | |
|---|---|
| <p>A. — Travaux du Laboratoire central d'Electricité.
 B — Production et utilisation mécanique de l'Electricité.
 C. — Eclairage.
 D — Chimie, électrochimie, électrometallurgie, piles, accumulateurs.
 E. — Appareillage général, canalisations.
 F. — Télégraphie, téléphonie, transmissions par ondes.
 G. — Recherches physiques.
 H. — Méthodes et instruments de mesure.</p> | <p>I. — Mathématiques, mécanique rationnelle et mécanique appliquée.
 K. — Génie civil.
 L. — Congrès, expositions, actes officiels, annuaires
 M. — Enseignement, aide-mémoires, formulaires, manuels.
 N. — Travaux des Sections.
 O. — Echos des sociétés étrangères.
 P. — Communications et informations diverses.</p> |
|---|---|

A. — TRAVAUX DU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

	PAGES
Pertes dans les tôles (Variation des) en fonction de l'induction, par M. Jouaust et Mlle Bourgoignon	285
Travaux de René Benoist en électricité, par M. Jouaust	611
Recherches sur les propriétés de l'aluminium, par M. Jouaust	663

2° IL Y A TRENTE ANS

Nouvelles installations du Laboratoire central, par M. de Nerville....	332
Règlement intérieur du Laboratoire central	332

B. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Alternateurs (sur l'amortissement des), par M. Bethenod	29
Pertes supplémentaires dans les machines électriques, par M. Roth ..	483
Utilisation de la puissance hydraulique dans les coopératives d'Electricité, par M. Lorfeuvre	307
Scott (sur le diagramme de), connexion utilisée pour l'alimentation de deux réseaux monophasés indépendants, par M. Stokvis..	729

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES (1)

Aménagement intégral et économique des forces hydrauliques. Nouveau mode de collecteurs d'eau avec prises à des réservoirs d'altitudes différentes. Application à une chute de 1 950 mètres, par Paul Basiaux, Ingénieur-Conseil. — Toulouse, Editions de l'Onde, 1923; brochure 26 cm × 16 cm, de 16 pages, avec 4 figures. (Don de l'auteur.)

(1) Quand un numéro de page est indiqué, il correspond à celle du compte rendu bibliographique.

Les ouvrages mentionnés peuvent être consultés par les membres de la S. F. E. à la Bibliothèque de la Société, 14, rue de Staël, de 14 à 17 heures.

Bobinages électriques (Construction des), Aide-Mémoire du bobinier, par C. Clément. — Paris, Dunod 1923; un vol. broché 25 cm × 17 cm, de xii-202 pages (avec 181 figures). (Don de l'éditeur.)	
Coups de béliet (Etude théorique et expérimentale sur les) dans les conduites forcées. Rapport de MM. E. Jouguet, A. Rateau et de Sparre, établi à l'occasion du 2 ^e Congrès de la Houille Blanche (1914). — Paris, Dunod et Pinat, 1917; un vol. broché 28 cm × 18 cm, de x-131 pages (avec figures et planches hors-texte). (Don de M. A. Rateau et du Comité hydrotechnique.)	
Electricité à la campagne (L'), par M. René Champly, 2 ^e édition, revue et augmentée. — Paris, Desforges 1922; un vol. broché 25 cm × 14 cm, de 294 pages (avec 284 figures). (Don de l'éditeur.)	
Enroulements (Les) industriels des machines à courant continu et à courants alternatifs. Théorie et pratique, par M. Eugène Marec. Préface de M. Paul Janet. (Don de l'éditeur.)	245
Force motrice (La) électrique dans l'industrie, par M. Eugène Marec. Préface de M. Paul Janet. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922. (Don des éditeurs.)	40
Forces (Les) hydrauliques et les Usines hydroélectriques. Aménagement des chutes d'eau et des centrales électriques, par M. Etienne Pacoret. — Paris, Delagrave, 1923. (Don de l'éditeur.)	781
Houille (La) blanche dans la petite industrie agricole et rurale, par MM. P. Guieu et F. Babey. — Paris, Garnier frères, 1922. (Don de l'éditeur.)	273
Houille (La) blanche, par M. Henri Cavailles. — Paris, Armand Colin, 1922. (Don de l'éditeur.)	
Machines dynamo-électriques (Calcul et spécification des), par M. Miles Walker (traduction française par M. J. Keraly). — Paris, Ch. Béranger, 1922. (Don de l'éditeur.)	273
Machine électrique (La construction économique de la), par M. Milan Vidmar, professeur à l'Université de Ljubliana (Serbie), (traduit de l'allemand par M. D. Schepse). — Paris, Dunod, 1923; un vol. 25 cm × 16 cm, de vi-133 pages (avec 7 figures). (Don de l'éditeur.)	
Maladies (Les) des machines électriques, par M. Ernest Schulz. 3 ^e édition française refondue et augmentée, traduite sur la 6 ^e édition allemande par M. G. Happick. — Paris, Dunod, 1923. (Don de l'éditeur.)	245
Marées (Les) et leur utilisation industrielle, par M. E. Fichot. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol. 19 cm × 14 cm, de vi-255 pages (Collection « Science et Civilisation »). (Don de l'éditeur.)	
Transformateurs (Les), par M. P. Bunet. Encyclopédie d'Electricité industrielle, publiée sous la direction de M. Blondel. — Paris, J.-B. Baillièrre et fils, 1923; un vol. broché 24 cm × 16 cm, de 632 pages (avec 456 figures). (Don des éditeurs.)	
Tuyères de turbines à gaz (Essai d'une étude sur les pertes par frottement). Mémoire présenté à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris par M. D.-A. Peaslee. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1919. (Don de l'auteur.)	274

3^e RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Autotransformateurs (Chute de tensions des) et des régulateurs d'induction, par M. Della Salda. (<i>Elettrotecnica</i> , 25 juin 1921.)	204
Courant de court-circuit des génératrices et moteurs d'induction, par MM. Doherty et Williamson. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , juillet 1921.)	78
Dynamos (Equations des courbes caractéristiques), par M. Matteini. (<i>Elettrotecnica</i> , 15 juin 1921.)	205
Génératrice d'induction excitée par condensateurs, par M. Sordina. (<i>Elettrotecnica</i> , 15 mai 1921.)	204
Matériel de conversion utilisé dans les sous-stations d'énergie, par MM. Barton et Hambleton. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , mars 1921.)	206

	PAGES
Moteur d'induction monophasé (Equivalence des deux théories du), par M. Karapetoff. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , août 1921.)	277
Moteurs asynchrones (Le fonctionnement des) sous tension et fréquence variables, par M. Carlavero. (<i>Elettrotecnica</i> , 5 juillet 1921.)	205
Transformateurs électrostatiques et coefficients d'accouplement, par M. Blake. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , janvier 1921.)	206

4° IL Y A TRENTE ANS

Adhérence magnétique (Appareils à), par de Bovet	40
Couplage des alternateurs (Sur les conditions du), par M. Blondel	40, 80
Usine d'éclairage électrique de la gare Saint-Lazare (Nouvelle), par M. Cance	168
Transmission et distribution de la force motrice (Concours institué par la Société industrielle de Mulhouse), par M. Desroziers	248

C. — ÉCLAIRAGE

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Eclairage artificiel des studios, par M. Bossu	227
Observations, par M. le professeur Broca	239
Lumière au mercure (Note sur les effets physiologiques et actiniques de la), par M. Leblanc	251
Réplique, par M. le professeur Broca	254
Tubes fluorescents (Présentation de). Radiations excitant la fluorescence, par M. Risler	293

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

Commission internationale de l'Eclairage en succession à la Commission internationale de Photométrie. 5° session, Paris, juillet 1921. Recueil des travaux et compte rendu des séances, publié par les soins du Comité national français de l'Eclairage et du Bureau central de la Commission internationale. — Teddington, The National Physical Laboratory, 1923; un vol. broché 24 cm × 15 cm, de 224 pages. (Don de la Commission.)	
Eclairage (L'). Solutions modernes des problèmes d'éclairage industriel, par M. E. Darmon. Préface de M. A. Blondel. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, Masson et Cie, 1923; un vol. broché 20 cm × 14 cm, de xv-276 pages (avec 99 figures) (« Encyclopédie Léauté »). (Don de l'éditeur Gauthier-Villars et Cie.)	
Instruments d'optique, par M. H. Pariselle, professeur à la Faculté des Sciences de Lille. — Paris, Armand Colin. (Don de l'éditeur.)	781
Optique physiologique (Leçons d'), professées à l'Institut d'optique théorique et appliquée par M. le D ^r André Broca et recueillies par M. Albert Arnulf. — Paris, 1923. (Don de l'auteur.)	781
Rayonnement (Principes scientifiques de l'Eclairage), par M. A. Blanc. Paris, Armand Colin, s. d.; un vol. broché 18 cm × 11 cm, de vi-212 pages (avec 35 figures), (« Collection Armand Colin ») n° 1. (Don de l'éditeur.)	

3° IL Y A TRENTE ANS

Chaleur et Lumière dans l'arc, par M. Violle	279
--	-----

D. — CHIMIE, ÉLECTROCHIMIE, ÉLECTROMÉTALLURGIE, PILES, ACCUMULATEURS

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Accumulateurs électriques (Sur les), par M. Nissou	213
Accumulateurs (Essais de véhicules à traction par). Programme, par M. Tribot-Laspière	255
Observations de M. de la Valette	258

Electrolyse (Les phénomènes de surtension dans l') et l'influence des colloïdes, par MM. C. Marie et Audubert	508
Fours électriques à haute fréquence, par M. Ribaud	583

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

Accumulateurs électriques (Les), par M. Alfred Soulier. — Paris, Garnier frères, 1923; un vol. broché 19 cm × 12 cm, de 200 pages (avec 82 figures). (Don des éditeurs.)	
Azote (L'). La fixation de l'azote atmosphérique et son avenir industriel, par M. Louis Hackspill. — Paris, Masson et C ^o , Gauthier-Villars et Cie, 1922. (Don de l'éditeur Masson et Cie)	782
Blei-Akkumulatoren (Die Krankheiten des), von F.-E. Kretzschmar 2te verbesserte Auflage. — München, R. Oldenbourg, 1922; un vol. 23 cm × 15 cm, de viii-176 pages. (Don de l'éditeur)	
Chimie (La) et la guerre, Science et Avenir, par M. Charles Moureu. — Paris, Masson et Cie, 1921 (Collection « Les Leçons de la guerre ».) (Don de l'éditeur.)	783
Chimie (Les méthodes actuelles de la), par M. Pierre Jolibois. — Paris, Armand Colin, 1923; un vol. broché 18 cm × 11 cm, de vi-192 pages (avec 45 fig.) (« Collection Armand Colin », n° 37.) (Don de l'éditeur.)	
Electro-Sidérurgique (L'). Fabrication de l'acier au creuset, par M. Ch. Clausel de Coussergues. — Paris, J.-B. Baillière et fils, 1923; un vol. broché 23 cm × 16 cm, de 416 pages (avec 150 fig.) (« Encyclopédie minière et métallurgique. ») (Don des éditeurs.)	
Elektro-Metallföhen (Die), Von E.-F. Russ. — München, R. Oldenbourg, 1922. (Don de l'éditeur.)	787
Métallurgies électrolytiques (Les) et leurs applications, par M. Albert Levasseur, professeur d'électrometallurgie à l'Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielle de Paris et à l'Ecole Bréguet. — Paris, Dunod, 1921. (Don de l'éditeur.)	246
Précipitation électrique de l'acide sulfurique dans les fumées et des poussières contenues dans les gaz des fours à pyrite, par M. Delasalle. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; une brochure 25 cm × 17 cm, de 42 pages (avec 8 planches hors-texte). Extrait du « Mémorial des Poudres ». (Don de l'auteur.)	
Progrès (Les) de la Métallurgie du cuivre, par M. Auguste Conduche. — Paris, Masson et Cie, Gauthier-Villars et Cie, 1922; un vol. 20 cm × 14 cm, de xv-254 pages. (Encyclopédie Léauté.) (Don de l'éditeur Masson et Cie)	
Soudure (La) électrique. Soudure par résistance, soudure à l'arc, machines à souder, exemples de travaux, par M. Varinois. — Paris, Dunod, 1923. (Don de l'éditeur.)	275

3° IL Y A 30 ANS

Accumulateur Peyrusson, type Planté, par M. Peyrusson	208
Cémentation électrique du fer, par MM. Garnier et Hillairet	332

E. — APPAREILLAGE GÉNÉRAL, CANALISATIONS

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Lampes électroniques de grande puissance (Le rôle industriel des), par M. Maurice Leblanc	3
Electrification du Chemin de fer de Paris à Orléans, par M. Parodi	83
Lignes de transmission à grande distance (Calcul des), par M. Darrieus	534
Pertes d'énergie dans les diélectriques, par M. Granier	333

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

Calcul pratique des conducteurs dans les installations électriques (sur réseaux publics et privés), par M. P. Maurer. — Paris, Desforges, 1923; un vol. broché 25 cm × 17 cm, de 56 pages (avec 3 fig. et 10 abaques hors-texte). (Don de l'éditeur.)	
---	--

- Construction des réseaux d'énergie**, par M. Daval. — Paris, J.-B. Bail-
lère et fils, 1922 ; un vol. cartonné 16 cm × 11 cm de 275 pages
(avec 102 fig.). (« Bibliothèque professionnelle. ») (Don de l'édi-
teur.)
- Electrification générale du territoire** (un problème national :), par
M. Charles Boileau. — Paris, Imprimerie J. Téqui, 1923. (Don
de l'auteur.) 784
- Essais des fils et câbles** (Des) isolés au caoutchouc, par M. A.-R. Ma-
this. Avant-propos de M. Emile Uytborek. — Paris, Dunod, 1923 ;
un vol. broché 22 cm × 15 cm, de 128 pages (avec fig.). (Don de
l'éditeur.)
- Protection** (La) des réseaux et des installations électriques contre les
surtensions, par M. G. Capart. Préface de M. L. Barbillion. 2^e édi-
tion. — Paris, Dunod, 1920. (Don de l'éditeur.) 781

3° RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

- Câbles sous papier pour basse tension** (Températures de sécurité des),
par M. W.-A. Del Mar. — American Institute of Electrical Engi-
neers, février 1921 78
- Distribution de l'électricité** (La), par M. Woodhouse. — Institution of
Electrical Engineers, janvier 1921 168
- Isolateurs à suspension** (Production moderne des), par MM. Frety et
Gilchrest. — American Institute of Electrical Engineers, juin
1921 276
- Lignes d'alimentation** (Nouveau système de) pour traction à courant
continu, par M. Sorelli. — Elettrotecnica, 15 mai 1921 204
- Ligne de transmission d'énergie** (Essais sur une), par M. Lewis. —
American Institute of Electrical Engineers, juin 1921 206
- Lignes de transmission d'énergie** (Longues) à haute tension, par M.
Mac Kinsty. — Institution of Electrical Engineers, octobre 1920 168
- Parafoudre à oxyde et à pellicules**. Essai de durée, par M. Lougee. —
American Institute of Electrical Engineers, novembre 1920..... 78
- Pylônes** (Le poids en fonction de la portée des), par M. Fascetti. —
Elettrotecnica, 5 août 1921 277

4° IL Y A 30 ANS

- Isolants hétérogènes**, par MM. Hess et Gerald. — Discussion : MM.
Picou, Gerald et Arnoux 168
- Mise à la terre dans les distributions électriques**, par M. R.-V. Picou
Sécurité des distributions des courants alternatifs à haute tension
(Moyens d'augmenter la), par M. Claude 787
- Transmission et distribution de la force motrice** (Concours institué
par la Société industrielle de Mulhouse), par M. Desroziers 248

F. — TÉLÉGRAPHIE, TÉLÉPHONIE, TRANSMISSIONS PAR ONDES

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

- Méthodes d'essais des appareils téléphoniques**, par M. Valensi 699
- Observations : MM. Ravut, Cahen, Janet, Courtois, Valensi 699
- Ondes électriques de l'ordre du mètre : génération, propagation**, par
MM. Mesny et David 605

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Radiocommunication** (La théorie et la pratique de la), par M. Léon
Bouthillon : Tome I. Introduction à l'étude des Radiocommuni-
cations. Tome II. La propagation des ondes électromagnétiques à
la surface de la terre. — Paris, Delagrave, 1922 et 1923 ; 2 vol.
25 cm × 16 cm, brochés. (Don de l'éditeur.)
- Radiophonie** (Contribution à l'étude des applications de la), par M.
Maurice Vinot, ingénieur civil. Préface de M. Gaston Vidal, sous-
secrétaire d'Etat à l'Enseignement technique. — Paris, Typogra-
phie François Bernouard, 1923 ; un vol. 29 cm × 22 cm, de 40
pages. (Don de l'auteur.)

Radiotélégraphie (Etude de quelques problèmes de Radiotélégraphie), par M. H. de Bellescize. — Paris, Gauthiers-Villars et Cie, 1920; un vol. broché 25 cm × 16 cm, de viii-174 pages (avec 62 fig.) (Don de l'éditeur.)	782
Radiotélégraphie et Radiotéléphonie à la portée de tous, par M. G. Malgorn. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol. broché 23 cm × 14 cm, de viii-231 pages (avec 160 fig.) (Don des éditeurs.)	
Radiotélégraphie, Radiotéléphonie, Radioconcert, par M. E. Reynaud-Bonin. — Paris, Gauthiers-Villars, 1923. (Don de l'éditeur.)	274
Radiotéléphonie (La). Emission, réception, montage des postes d'amateurs, applications, par M. Carlo Toche, préface du général Ferrié. 1 ^{re} édition	40
2 ^e édition, revue et augmentée. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol. broché 25 cm × 16 cm, de viii-120 pages (avec 51 figures). (Don des éditeurs.)	782
Téléfonia (La) a grande distanza ed i ripetitori telefonici, par M. le D ^r A. Craverie et le commandant S. Demalde. — Torino-Genova, S. Lattes et Cie, 1922; un vol. relié toile 16 cm × 11 cm, de 416 pages (avec 124 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Télégraphie et téléphonie sans fil (Notions élémentaires de) et construction pratique de postes récepteurs, par M. Jean Remaur. 2 ^e édition revue et augmentée. — Paris, Desforges, 1923; un vol. broché 22 cm × 14 cm, de vi-160 pages (avec 99 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Télégraphie et Téléphonie sans fil, par M. C. GUTRON. 3 ^e édition refondue et mise à jour. — Paris, Librairie Armand Colin, 1923. (Don de l'éditeur.)	331
Télégraphie et Téléphonie sans fil (Vocabulaire en cinq langues de) avec les définitions officiellement adoptées et un répertoire alphabétique, par M. Henri Viard. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921; un vol. cartonné oblong 14 cm × 22 cm, de xii-108 pages. (Don des éditeurs.)	
Télégraphie électrique (Traité de), par M. H. Thomas. 2 ^e édition, revue et augmentée. — Paris, Ch. Béranger, 1922. (Don de l'éditeur.)	331
T. S. F. La Télégraphie sans fil, la Téléphonie sans fil, Applications diverses, par MM. G.-E. Petit et Léon Bouthillon. Préface par le professeur A. d'Arsonval. Nouvelle édition entièrement refondue. — Paris, Delagrave, 1920; un vol. 25 cm × 16 cm, broché, de vii-304 pages (avec 197 figures et 16 planches hors-texte). (Don de l'édit.)	
Télégraphiques (Appareils et installations), par MM. E. Montoriol-Baillère et fils, 1921. (Don de l'auteur.)	246
Téléphonie sans fil (Comment recevoir la), par M. Joseph Roussel. — Paris, Vuibert, 1923; un vol. broché 22 cm × 14 cm, de 272 pages avec 126 fig. et 2 planches hors-texte). (Don de l'éditeur.)	
Téléphonie sans fil (A B C de), par M. Fernand Vitus. — Paris, Delagrave, 1923; un vol. relié toile 17 cm × 13 cm, de 122 pages (avec 41 fig.) (« Collection des A. B. C. ») (Don de l'éditeur.)	
Téléphoniques (Installations). Guide pratique à l'usage du personnel des P. T. T. et des monteurs électriciens, par M. J. Schils. 4 ^e édition revue et mise à jour, par M. G. Cornet. — Paris, Dunod, 1923. (Don de l'éditeur.)	331
T. S. F. (Comment entendre chez soi la), par M. Alfred Soulier. — Paris, Garnier frères, 1923; un vol. broché 16 cm × 11 cm, de 91 pages (avec 38 fig.) (Bibliothèque pratique Garnier.) (Don de l'éditeur.)	
T. S. F. (La) des amateurs. Télégraphie, Téléphonie, par M. Franck Duroquier. 6 ^e édition, revue, mise à jour et complétée. — Paris, Masson et Cie, 1923. (Don des éditeurs.)	781
T. S. F. extérieure (Etude théorique de la). Longueur d'onde et propagation, par M. Vieillard, capitaine du génie. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921; un vol. broché 25 cm × 16 cm, de xii-416 pages (avec fig.) (Don de l'éditeur.)	782

- Wave length (The optimum) its application to the determination of the coefficient of dispersion of electromagnetic waves ; the optimum effective height of an antenna in some particular cases, par le professeur N.-M. Oboukhoff. Reprinted from Journal of the Prussian-Chinese Polytechnical Institute of Harbin (China). — Harbin, 1923; une brochure 26 cm × 19 cm, de 31 pages (avec 3 planches hors-texte). (Don de l'auteur.)
- Wireless Telegraphy and Telephony (The year-book), 1923. — London, the Wireless Press, 1923; un vol. 20 cm × 13 cm, cartonné toile de 1 477 pages. (Don de l'éditeur.)

3° RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

- Ondes complexes (Analyse harmonique des), par M. Dellenbaugh. — American Institute of Electrical Engineers, février 1921 206

G — RECHERCHES PHYSIQUES

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

- Ampoules à rayons X (Sur les), par M. Villard 723
- Répliques de M. Johannès 727
- Générateur moderne de rayonnement X, par M. Saget 43
- Pertes d'énergie dans les diélectriques, par M. Granier 333

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Atmosphère (L') et la prévision du temps, par M. J. Rouch. — Paris, Armand Colin, 1923; un vol. broché 18 cm × 11 cm, de 207 pages (avec 35 fig.) (Collection Armand Colin, n° 36.) (Don de l'éditeur.)
- Calcul tensoriel (Note sur le), par M. Assier de Pompignan. — Paris, Librairie Scientifique J. Hermann. (Don de l'éditeur.) 79
- Constantes et données numériques de Chimie, de Physique et de Technologie (Tables annuelles de), publiées par M. Ch. Marie. Volume IV : années 1913, 1914, 1915, 1916. Première et deuxième parties. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921-1922. (Don de M. Ch. Marie.) 245
- Constantes fondamentales et facteurs de conversion (formulaires), éditées par le Comité national des Recherches de Washington. (Don du Comité.) 332
- Dielectric Phenomena in high voltage engineering, by F.-W. Peek, Jr Second edition. — Mc Graw-Hill book Company, New-York, 1920; un vol. relié toile 24 cm × 15 cm, de xv-281 pages (avec 190 figures).
- Electrodynamique (L') des milieux isotropes en repos, d'après Helmholtz et Duham, par M. Louis Roy. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923. (Don de l'éditeur.) 274
- Eléments isotropes (Exposé concernant les résultats actuels relatifs aux), par M. Maurice de Broglie. — Librairie scientifique d'Hermann. (Don de l'éditeur.) 167
- Gravitation (Leçons élémentaires sur la), d'après la théorie d'Einstein, par M. E.-M. Lémeray. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1921. (Don des éditeurs.) 245
- Isotopes (Les), par M. A. Damiens. Préface de M. Jean Perrin. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923 ; un vol. broché 25 cm × 16 cm de ix-118 pages (avec 33 figures.) (Don de l'éditeur.)
- Magneto-Optische Vershijnselen (Verhandelingen van Dr. P. Zeeman over). — Leidan, Eduard Ljdo, 1921. (Don du Comité pour la célébration de la découverte de l'effet Zeeman.) 244
- Météorologie (Manuel pratique de), par M. J. Rouch. 2° édition. — Paris, Masson et Cie, 1922; un vol. broché 22 cm × 14 cm, de viii-147 pages (avec 25 fig. et 14 planches et cartes hors-texte). (Don des éditeurs.)
- Pertes d'énergie (Les), par M. Jean Granier. — Paris, Revue générale de l'Electricité, 1923; un vol. broché 28 cm × 17 cm, de 157 pages (avec fig.). (Thèse de doctorat ès-sciences physiques.) (Don de l'auteur.)

Physique du globe, par M. Ch. Maurain. — Paris, Armand Colin, 1923; un vol. broché 18 cm × 11 cm, de vi-204 pages (avec 21 fig.). (« Collection Armand Colin », n° 35). (Don de l'éditeur.)	
Physique du globe (Annales de l'Institut de) de l'Université de Paris et du Bureau central de Magnétisme terrestre, publiées par les soins de M. Ch. Maurain. Tome I. — Paris, les Presses universitaires de France, 1923. (Don de M. Maurain.)	786
Rayons d'Electricité positive et leur application aux analyses chimiques (Les), par M. J.-J. Thomson. Traduit d'après la 2 ^e édition anglaise, par MM. R. Fric et A. Corvisy. — Paris, J. Hermann. (Don de l'éditeur.)	167
Rapports de documentation sur la Physique (Recueil des Conférences). Première série : Vol. 1. Les rayons X, par M. Maurice de Broglie; vol. 2. La théorie des Quanta et l'atome de Bohr, par M. Léon Brillouin; vol. 3. L'arc électrique, par M. Maurice Leblanc fils; vol. 4. Les phénomènes thermoioniques, par M. Eugène Bloch; vol. 5. La lampe à trois électrodes, par M. C. Gutton; vol. 8. L'évolution des étoiles, par M. Jean Bosler. — Paris, édité par la Société « Journal de Physique », 1922-1923. (Don de la Société « Journal de Physique ».)	244
Relativité. Cohésion, gravitation (Contraction de Lorentz et), par M. F. Guéry. — Paris, 1922, extrait de la <i>Revue générale de l'Electricité</i> ; un vol. 22 cm × 14 cm, de 80 pages. (Don de l'auteur.)	
Relativité (La) vraie et la gravitation universelle, par M. Georges Fournier. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923. (Don de l'auteur.)	783
Spectres (Les) et la structure de l'atome. 3 conférences, par M. Niels Bohr. Traduit sur le manuscrit de l'auteur par M. A. Corvisy. — Paris, J. Hermann, 1923; un vol. broché 23 cm × 15 cm, de 152 pages (avec 6 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Théorie cinétique des gaz, par M. Eugène Bloch. — Paris, Armand Colin. (Don de l'éditeur.)	783
Théorie d'Einstein (L'évidence de la), par M. Paul Drumaux. — Paris, Librairie scientifique J. Hermann. (Don de l'éditeur.)	79
Théorie électromagnétique de la lumière (Eléments de la), par M. Ludwik Silberstein. Traduit de l'anglais par M. Georges Matisse. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol. broché 29 cm × 12 cm, de iv-94 pages. (Don des éditeurs.)	
Théorie de la relativité (La) généralisée dans ses grandes lignes. (Espace, temps et gravitation). Exposé rationnel suivi d'une étude mathématique de la théorie, par M. A.-S. Eddington. Ouvrage traduit de l'anglais par M. J. Rossignol, avec une introduction de M. P. Langevin. — Paris, J. Hermann, 1921. (Don de l'éditeur.)	785

3° RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Magnétron ou tube à vide à haute fréquence : fonctionnement sous l'action d'un champ magnétique, par M. Albert-W. Hull. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , septembre 1921.)	278
Propriétés magnétiques du fer pulvérisé et comprimé, par Speed et Elmen. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , juillet 1921.)	205
Résistance électrique de l'air (Action des potentiels continus et influence de la température), par MM. Whitehead et Lee. (<i>American Institute of Electrical Engineers</i> , mai 1921.)	276

4° IL Y A 30 ANS

Grandeurs électriques (Idées modernes sur les), par M. Guillaume..	208
--	-----

H. — MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE MESURE

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Transformateurs d'intensité compoundés, par M. Ilivici	55
--	----

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Appareils de mesures électriques, par M. Chirol. — Paris, J.-B. Bail-
lière et fils, 1923; 1 vol. cartonné 16 cm × 11 cm, de 332 pages
(avec 206 figures). (« Bibliothèque Professionnelle ».) (Don des
éditeurs.) 783
- Compteurs (Les) électriques, par M. Fontaine. — Paris, Ch. Béran-
ger, 1922; un vol. 26 cm × 17 cm, de 139 pages (avec 137 figu-
res). (Don de l'éditeur.)
- Essais des machines électriques. Installation des plateformes d'essais.
Interprétation des essais, par M. H. Delalande. — Paris, Ch. Bé-
ranger, 1923; un vol. relié toile 24 cm × 16 cm, de 442 pages
(avec 213 figures). (Don de l'éditeur.)
- Mesures électriques et Essais de machines (Cours de), professé à
l'Ecole spéciale des Travaux publics, par M. Eug. Vigneron. —
Paris, Librairie de l'Enseignement technique, Léon Eyrolles,
1921-1922; 2 vol. 25 cm × 16 cm, de 551 pages (avec 416 fi-
gures) et 613 pages (avec 300 figures). (Don de l'éditeur.)

3° RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

- Compteur d'électricité (L'erreur moyenne d'un), par M. Stubbings.
(*Institution of Electrical Engineers*, mars 1921.) 277
- Demande maximum (La mesure de la), par M. Borden. (*American
Institute of Electrical Engineers*, octobre 1920.) 168
- Pertes dans le fer (Méthode industrielle pour déterminer les), par
M. Barbagelata. (*Elettrotecnica*, 25 août 1921.) 276
- Régulation de la fréquence employée dans les buts de mesure, par
M. Smith. (*American Institute of Electrical Engineers*, février
1921.) 206

4° IL Y A 30 ANS

- Galvanomètre portatif Ducretet et Lejeune, par M. Lejeune 332
- Ohmmètre Carpentier, par M. Armagnat 248

I. — MATHÉMATIQUES, MÉCANIQUE RATIONNELLE
ET MÉCANIQUE APPLIQUÉE

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Cinématique et Mécanismes, par M. H. Bricard. — Paris, Armand
Colin. S. D. (Don de l'éditeur.) 787
- Dynamique générale, par M. H. Bouasse. — Paris, Delagrave, 1923;
un vol. broché 25 cm × 16 cm, de xxiii-324 pages (avec 178
figures). (Don de l'éditeur.)
- Fonctions circulaires (Les) et les Fonctions hyperboliques étudiées
parallèlement en partant de la définition géométrique, par
M. Henri Tripiér. — Paris, Vuibert, 1923; un vol. broché
23 cm × 14 cm, de 58 pages (avec 25 figures). (Don de l'auteur.)
- Fonctions hyperboliques (Les applications élémentaires des) à la
science de l'ingénieur électricien, par M. A.-E. Kennelly. — Paris,
Gauthier-Villars et Cie, 1922. (Don de l'éditeur.) 785
- Fonctions uniformes (Leçons sur les) à point singulier essentiel isolé,
professées au Collège de France par M. Gaston Julia, rédigées par
M. P. Flamant. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol.
broché 25 cm × 16 cm, de 152 pages. (Collection de monogra-
phies sur la théorie des Fonctions, publiée sous la direction de
M. Emile Borel.) (Don des éditeurs.)
- Géométrie projective (Notions sommaires de) à l'usage des candidats
à l'Ecole polytechnique, par M. Maurice d'Ocagne. — Paris, Gau-
thier-Villars et Cie, 1923; un vol., broché 25 cm × 16 cm, de
25 pages. (Don des éditeurs.)
- Nomographie (Traité de). Etude générale de la représentation gra-
phique cotée des équations à un nombre quelconque de varia-
bles. Applications pratiques, par M. Maurice d'Ocagne. 2^e édition,
entièrement refondue, avec de nombreux compléments. — Paris,

- Gauthier-Villars et Cie, 1923; un vol. broché 25 cm × 16 cm, de xxiv-483 pages (avec 182 figures et 1 planche). (Don des éditeurs.)
- Probabilités, Erreurs, par MM. Emile Borel et Robert Deltheil. — Paris, Librairie Armand Colin, 1923. (Don de l'éditeur.)
- Règles à calcul Beghin (Traité théorique et pratique des). Règle de l'Ingénieur et règle de l'Officier de marine. Modes opératoires. Problèmes industriels. Tables et Formules, par M. Beghin, licencié ès sciences mathématiques et ès sciences physiques. 7^e édition. — Paris, Béranger, 1922. (Don de l'éditeur.) 167
- Résistance des matériaux analytique et graphique. Théories générales. poutres droites isostatiques et hyperstatiques, par M. Bertrand de Fontviolant. — Paris, J.-B. Baillière et fils, 1923; un vol. broché 23 cm × 16 cm, de xx-580 pages (avec 168 figures). (« Encyclopédie du Génie civil et des Travaux publics ».) (Don des éditeurs.)
- Résistance des Matériaux (Cours de) appliquée aux machines, professé à l'Ecole spéciale des Travaux publics et à l'Ecole de Physique et Chimie de la Ville de Paris, par M. Bayle. 4^e édition. — Paris, Librairie de l'Enseignement technique, Léon Eyrolles, 1922. (Don de l'éditeur.) 783
- Résistance des matériaux (Les méthodes modernes de la), par M. Bertrand de Fontviolant. 2^e édition, revue et augmentée. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1920; un vol. broché 25 cm × 16 cm, de 104 pages (avec 11 figures). (Don des éditeurs.)
- Statique et Dynamique, par M. Henri Beghin. — Paris, Armand Colin, S. D. (Don de l'éditeur.)
- Statique graphique (Cours de), par M. Georges Bayle. 2^e édition. — Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1920; un vol. broché 25 cm × 17 cm, de 164 pages (avec 120 figures). (Collection de « l'Encyclopédie industrielle et commerciale ».) (Don de l'éditeur.)
- Thermodynamique (Cours de) et de Théorie des Moteurs, par M. Louis Lacoïn. 2^e édition, revue et augmentée. — Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1921; un vol. broché 25 cm × 17 cm, de 208 pages (avec 60 figures). (Collection de « l'Encyclopédie industrielle et commerciale ».) (Don de l'éditeur.)

K. — GÉNIE CIVIL

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Chemins de fer à crémaillère, funiculaires et transports aériens (Cours de), par M. Lévy-Lambert. — Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1920; un vol. broché 25 cm × 17 cm, de 125 pages (avec 86 figures). (Collection de « l'Encyclopédie industrielle et commerciale ».) (Don de l'éditeur.)
- Navigation intérieure. Canaux. Cours professé à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, par M. O. Jacquinot, revu avec la collaboration de M. F. Galliot. — Paris, J.-B. Baillière et fils, 1922; un vol. broché 23 cm × 16 cm, de vii-600 pages (avec 244 figures). (Encyclopédie du Génie civil et des Travaux publics.) (Don des éditeurs.)

L. — CONGRÈS, EXPOSITIONS, ACTES OFFICIELS. ANNUAIRES

1^o COMMUNICATION FAITE A LA SOCIÉTÉ

- Exposition de Physique et de T. S. F., par M. de Valbreuze 260

2^o OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Annuaire du Ministère des Travaux publics. Année 1923. — Paris, A. Dumas, 1923; un vol. 21 cm × 13 cm, de 880 pages. (Don de l'éditeur.) 273

- Annuaire 1923 du Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Énergie électrique (27^e année). — Lille, Imprimerie Lefebvre-Ducrocq, 1923; un vol. cartonné 27 cm × 22 cm, de 782 pages. (Don du Syndicat.)
- Congrès de la Houille blanche et des Applications de l'électricité, tenu à Marseille, à l'occasion de l'Exposition coloniale, les 17-20 juin 1922. Organisé par l'Association des Anciens élèves de l'Institut électrotechnique de Grenoble « La Houille Blanche ». Tome I. — Grenoble, Editions J. Rey, 1923; un vol. 27 cm × 19 cm, de 122 pages (avec figures). (Don de M. L. Barbillon.)
- Congrès régional de l'électrification des campagnes, les 7, 8, 9 et 10 juin 1923, à Montpellier. Région économique. Office régional de l'Énergie électrique. Compte rendu des travaux, par M. R. Couvret. — Montpellier, Imprimerie Firmin et Montane, 1923. (Don du Secrétariat du Congrès.) 784
- Congrès scientifique international, organisé par l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège, à l'occasion du 75^e anniversaire de sa fondation. Liège. 18 au 24 juin 1922. — Liège, Vailant, Carmanne, 1922-1923, 9 vol. brochés 24 cm × 16 cm (avec figures et planches hors-texte). (Don de l'Administration du Congrès.)
- Corporation de l'Acier aux Etats-Unis. Etude industrielle, économique et sociale, par M. Arundel Cotter. Traduit de l'anglais, avec l'autorisation de l'auteur, adapté et commenté par M. André Aude. — Paris, Vuibert, 1923; un vol. broché 22 cm × 14 cm, de 237 pages (avec portrait hors texte). (Don de l'éditeur.)
- Industrie électrique française (L') à la 15^e Foire de Paris, 10-15 mai 1923. Album de l'acheteur. — Paris, 1923, édité par le groupe de l'Électricité, Syndicat professionnel des Industries électriques; un vol. 27 cm × 17 cm, de 124 pages (avec figures). Don du Syndicat professionnel.)

3^e IL Y A 30 ANS

- Congrès international des électriciens de Chicago 1893. Programme par M. Hospitalier 168
- Discussion : MM. Blondel, Guillaume, Hospitalier, Boucherot.... 203
- Décisions du Congrès de Chicago, par M. Pellat 279
- Congrès de Chicago. Notes de voyage, par M. Mascart 628
- Inauguration du Laboratoire central, rue de Staël 279
- Instructions et circulaire du ministère des T. P. sur l'établissement des canalisations sur les voies publiques et sur la réglementation des conducteurs sur la grande voie nationale 628

M. — ENSEIGNEMENT, AIDE-MÉMOIRES, FORMULAIRES, MANUELS

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

- Dessinateur électricien (Manuel pratique du), par M. H. de Graffigny. — Paris, Desforbes, 1923; un vol. broché 19 cm × 12 cm, de 196 pages (avec 178 fig.). (Don de l'éditeur.)
- Electricien (Formulaire de l') et du Mécanicien, 30^e édition, par M. Gaston Roux. — Paris, Masson et Cie, 1921. (Don de l'éditeur.) 245
- Electricité (Eléments d'), par M. Charles Fabry. — Paris, Armand Colin, s. d. (Don de l'éditeur.) 786
- Electricien (La technique du Métier d'), par MM. Roger Caillaud et Camille Baud, 2^e édition. — Paris, Dunod, 1922; un vol. broché 22 cm × 14 cm, de vii-256 pages (avec 280 fig.) (Don de l'éditeur.)
- Electricité. Première partie : Théorie, Production, Transformation, par M. E. Dacremont. 2^e édition, mise à jour par M. L. Grininger. — Paris, Dunod, 1923; un vol. relié toile 18 cm × 12 cm, de xii-846 pages (avec 609 figures). (Don de l'éditeur.)

	PAGES
Electricité industrielle, par M. Harang, professeur d'électricité et de technologie industrielle à l'Ecole municipale Dorian et à l'Ecole Edgar-Quinet. — Paris, Dunod, 1921. (Don de l'éditeur.)	79
Electricité industrielle (Cours d'). Le courant continu. Notions physiques. Génératrices et Réceptrices. Accumulateurs. Distributions. Mesures, par M. F. Magonette. 2 ^e édition augmentée. — Paris, Dunod, 1923. (Don de l'éditeur.)	
Electricité industrielle (L') mise à la portée de l'ouvrier. Manuel pratique, par M. E. Rosenberg. Adaptation française par M. A. Mauduit. 7 ^e édition revue et augmentée. — Paris, Dunod, 1923. (Don de l'éditeur.)	275
Electricité théorique (Traité d'), par M. Carvallo, agrégé de l'Université, répétiteur de physique à l'Ecole Polytechnique. — Paris, Dunod, 1921. (Don de l'éditeur.)	79
Electrotechnique (Cours d'), professeur à l'Ecole des Travaux publics, par M. Iliovici, ancien chef de travaux au Laboratoire central et à l'Ecole supérieure d'Electricité. Livre I : Lois générales de l'électricité et du magnétisme. — Paris, Léon Eyrolles, 1921. (Don de l'auteur.)	247
Entrepreneur électricien (Aide-mémoire et schémas de l'), par M. P. Maurer. — Paris, Dunod, 1923; un vol. relié toile 21 cm × 13 cm, de viii-620 pages (avec 364 fig. et 4 planches.) (Don de l'éditeur.)	
Monteur électricien (Guide élémentaire du), par M. Gaisberg. Nouvelle traduction et adaptation française de la 80 ^e édition originale, par M. G. Happich. — Paris, Dunod, 1923; un vol. 21 cm × 13 cm, de iv-416 pages (avec 231 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Monteur électricien (Guide du), par M. R. Swyngedauw. Préface de M. Labbé, directeur de l'Enseignement technique. Conseils pratiques, par M. Loiseau, ingénieur-installateur. Tome I : Notions fondamentales sur le courant électrique et leur application au montage des canalisations électriques intérieures. — Paris, Ch. Béranger, 1922; un vol. 22 cm × 14 cm, de xii-297 pages (avec 193 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Magnétisme et électricité (Cours de), par M. H. Bouasse. 2 ^e édition complètement transformée et considérablement augmentée. — Paris, Delagrave, 1914-1920; 3 vol. brochés 25 cm × 16 cm, de xx-448 pages (avec 300 fig.), de xxi-559 pages (avec 339 fig.) et de xxxi-653 pages (avec 350 fig.). (Don de l'éditeur.)	
Traction électrique (Manuel de l'apprenti et de l'amateur électricien), 4 ^e partie, par M. Robert Marie. 2 ^e édition, revue et augmentée. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922. (Don de l'éditeur.)	273

N. — TRAVAUX DES SECTIONS

1^{re} SECTION

Communication de M. Stokvis sur le diagramme des transformateurs dans la connexion Scott	241
Communication de M. Beuque sur les surtensions	262
Communication de M. Jouaust sur les pertes dans les tôles	262
Communication de M. Lorgeuvre sur l'utilisation d'usines hydrauliques d'appoint munies de génératrices asynchrones compensées.	262
Note de M. Belfils sur le coefficient de surcharge	262
Programme des travaux	263, 756
Communication de M. Roth sur les pertes supplémentaires dans les machines	320
Adoption des fascicules de l'Union des Syndicats de l'Electricité...	757
Coefficient de déformation des courbes d'alternateurs	757
Etude des isolants	758

2° SECTION

Eclairage des écoles et des locaux industriels	263, 322,	759
Cahier des charges des lampes à milieu gazeux	263, 323,	758
Programme des travaux		263
Détermination du rapport entre l'éclairement sur le toit d'un immeuble et l'éclairement en un point situé à l'intérieur		322
Construction des lumenmètres		322
Cahier des charges pour lampes d'automobiles		758
Legs Cheux		758

3° SECTION

Communication de M. Tribot-Laspière sur les essais contrôlés de véhicules à accumulateurs		263
Programme des travaux	264,	759
Communication de M. George sur la silice fondue au four électrique		323
Communication de M. Altmayer sur l'électrometallurgie du zinc aux Etats-Unis		323
Communication de M. Ribaud sur les fours à haute fréquence		759

4° SECTION

Programme des travaux		264
Communication de M. Lachaise sur l'abaque de Clarke pour le calcul des lignes à haute tension		323, 761
Examen des fascicules de l'Union des Syndicats de l'Electricité		760
Appel aux membres de la Société pour la mise au point de la question des redresseurs à mercure		760

5° SECTION

Communication de M. Valensi sur les méthodes d'essai des appareils téléphoniques		324
Communication de M. Bethenod sur la théorie du récepteur téléphonique		762

6° SECTION

Communication de M. Maurain sur la conductibilité électrique de l'atmosphère		266
Communication de M. Jouaust sur la variation des pertes dans les tôles avec l'induction		267
Communication de M. Ilievici sur les relais de protection des réseaux contre les surintensités		267
Communication de M. Guy sur la théorie de la relativité		763

O. — ÉCHOS DES SOCIÉTÉS ÉTRANGÈRES

AMERICAN ENGINEERING STANDARDS COMMITTEE

Annuaire	166
Etude des abréviations et symboles	166

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

Comité de direction du 16 mars 1923 :	
Election du Président Harris Ryan	165
Révision des règles techniques	165
Réunion de printemps à Pittsburgh. Liste des questions qui y ont été traitées. Discussion sur l'interconnexion des réseaux	325
Séance annuelle du 18 mai 1923, à New-York :	
Statistique des membres	327
Célébration aux Etats-Unis du 75° anniversaire de la Société des Ingénieurs civils de France	328

	PAGES
Désignation d'un Comité de nomenclature pour l'industrie de l'éclairage	328
Communication du secrétariat sur le rapport des tensions continue et alternative à adopter pour les essais de câbles au papier imprégné	615
Question mise à l'étude par le Conseil national de recherches : étude des isolants	616
Réunion de Swampscott, Massachusetts, 25-29 juin 1923 :	
Liste des questions traitées	616
Décisions des délégués des Sections à la réunion de juin : présentation préalable aux Sections des rapports sur les questions traitées; modification du mode de publications dans le Journal et dans les Transactions ; réunions des comités de district ; organisation d'un service de placement commun pour les quatre Sociétés américaines d'ingénieurs	619
Normalisation des lignes électriques aériennes sur les chemins de fer	620
Conseil des Ingénieurs américains : conférence mondiale de l'énergie	621
Résumé des modifications apportées aux publications de l'A. I. E. E.	621
Dîner en l'honneur de Ferguson	622
Réunion à Del Monte, octobre 1923 :	
Liste des matières traitées	766
Invitation de l'Association des électriciens tchécoslovaques. Remise de la médaille Edison au docteur Millikan	766
Réunion des directeurs, le 26 octobre 1923 :	
Conférence des superréseaux	767
Legs pour l'école électrotechnique de Philadelphie	767

ASSOCIATION ARGENTINE DE L'ELECTROTECHNIQUE

Nomenclature électrotechnique	272
-------------------------------------	-----

ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Statuts du Comité suisse de l'éclairage	269
37 ^e Assemblée générale de l'Association : adoption de règles diverses	269
40 ^e Assemblée générale de l'Union des Centrales suisses : fixation des subventions industrielles au Bureau de contrôle et au Laboratoire. Discussion sur l'unification des hautes tensions. 279,	271
Normes pour les essais de transformateurs	271
Etat financier des institutions de contrôle de l'Association	272
Liste des hautes tensions unifiées	329
Instruction sur la protection contre les surtensions	330
Organisation de stages d'étudiants dans les établissements industriels	622
Enquête sur les mesures prises contre les incendies d'appareils	623
Examens d'installateurs	623
Normalisation des tensions et des méthodes d'essai des isolants	624
Normes pour les tensions et pour les essais d'isolement	779

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

Réunion du Conseil général du 20 avril 1923 : Fixation de la date du congrès d'automne. Vœu tendant à ce que l'Associazione soit consultée pour la préparation des dispositions législatives	202
Réunion du groupe de Milan du 1 ^{er} mars 1923	202
Assemblée générale du groupe de Milan du 23 mars 1923	202
Réunion du groupe de Bologne de février 1923	202
Inauguration des comptes rendus sténographiques des discussions en séances de l'Associazione	269
Discussions du groupe de Milan (16 mars 1923) et du groupe de Bologne (15 avril 1923)	268

	PAGES
Réunion du groupe de Turin (16 mai 1923). Communications diverses	330
Constitution du groupe de Sardaigne	625
Réunion du groupe de Turin du 3 mai 1923	625
Assemblée générale du groupe de Trente du 3 mai 1923. Décisions et discussions	625
28 ^e réunion de l'Associazione tenue à Venise, du 30 septembre au 6 octobre 1923. Liste des sujets traités et des vœux émis au sujet des ondes guidées	626

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

Dîner annuel de 1923	75
Réunion du bureau du 15 février 1923	165
Attribution de la médaille Faraday à Sir Algernon Parsons	165
Attribution de bourses de scolarité aux fils de victimes de la guerre	165
Désignation des délégués à la Conférence internationale des grands Réseaux	165
Ouverture d'un registre de placement	165
Communication de M. Dennery sur la conférence téléphonique internationale tenue à Paris le 12 mars 1923	242
Questions à l'étude	243
Election du nouveau Président, docteur Russell	328
Fixation du nouveau taux des cotisations	329
Résultats d'un referendum sur l'heure des séances	627
Adresse inaugurale du Président M. Russell	767
Adresses inaugurales des Présidents de groupes	773
Sections techniques	778

SOCIÉTÉ BELGE DES ELECTRICIENS

Rapport de M. le Président Bède sur l'activité de la Société en 1922-1923	779
Constitution de sections	780

P. — COMMUNICATIONS ET INFORMATIONS DIVERSES

Affectation des legs en 1923	751
Assemblée générale annuelle du 11 avril 1923	169
Allocution de M. Marcel Brillouin, président sortant	190
Allocution de M. le Président	210
Composition des bureaux des Sections et ordre du jour de leurs travaux	319
Compte rendu de la visite au laboratoire à 1 million de volts	752
Compte rendu des visites à l'Exposition de Physique et de T. S. F.	753
Création d'un poste de Délégué général de la Société française des Electriciens (modifications du règlement intérieur d'administration)	196
Décisions du Bureau du Comité	211, 241
Dons à l'Ecole	170, 210
Dons au Laboratoire	210
Dons à la Société	210
Ecole supérieure d'Electricité, promotion XXIX	571
Erratum	628
Invitation de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale aux fêtes de son anniversaire	260
Membres décédés	2, 82, 170, 283, 579, 633
Membres titulaires	1, 41, 81, 169, 209, 249, 281, 577, 633
Nécrologie :	
Adrien Bochet	71
Maurice Leblanc	573
Violle, par M. Villard	751
Organisation d'essais contrôlés d'appareils de T. S. F.	751
Prix triennal de la fondation G. Montefiore	614

	PAGES
Rappel des principales décisions du Bureau, du Comité et de l'Assemblée générale en 1923	764
Rapport de la commission des comptes (M. Guéry)	171
Rapport annuel sur le fonctionnement du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Electricité (M. Janet)	183
Rapport du Comité (M. Maurice Leblanc, Secrétaire général)	179
Réunion mensuelle ordinaire du 3 janvier 1923	1
Réunion mensuelle ordinaire du 7 février 1923	41
Réunion mensuelle ordinaire du 7 mars 1923	81
Réunion mensuelle ordinaire du 11 avril 1923	169
Réunion mensuelle ordinaire du 2 mai 1923	209
Réunion mensuelle ordinaire du 1 ^{er} juin 1923	249
Réunion mensuelle ordinaire du 4 juillet 1923	281
Réunion mensuelle ordinaire du 3 novembre 1923	577
Réunion supplémentaire du 19 novembre 1923	630
Réunion mensuelle ordinaire du 1 ^{er} décembre 1923	633
Résultats des élections : MM. Appell et Ferrié, Présidents d'honneur. Renouvellement partiel des membres du Bureau, du Comité et de la Commission des Comptes	194

Table des noms d'Auteurs

CITÉS DANS LE TOME III (4^e SÉRIE)

COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

	PAGES
BETHENOD. — Alternateurs (Sur l'amortissement des)	29
BOSSU. — Eclairage artificiel des studios	227
BROCA. — Observations sur la communication de M. Bossu	239
BROCA. — Observations sur la communication de M. Leblanc	254
DARRIEUS. — Lignes de transmission à grande distance (Calcul des)	534
GRANIER. — Pertes d'énergie dans les diélectriques	333
ILIOVICI. — Transformateurs d'intensité compoundés.	55
JOHANNÈS. — Réplique à la communication de M. Villard	727
JOUAUST et Mlle BOURGOIGNON. — Pertes dans les tôles (Variation des) en fonction de l'induction	285
JOUAUST. — Travaux de René Benoist en électricité	611
JOUAUST. — Recherches sur les propriétés de l'aluminium	663
LEBLANC (Maurice). — Lampes électroniques de grande puissance (Le rôle industriel des)	3
LEBLANC (Maurice). — Lumière au mercure (Note sur les effets physio- logiques et actiniques de la)	251
LORFEUVRE. — Utilisation de la puissance hydraulique dans les coo- pératives d'électricité	307
MARIE (C.) et AUDUBERT. — Electrolyse (Les phénomènes de surten- sion dans l') et l'influence des colloïdes	508
MESNY et DAVID. — Ondes électriques de l'ordre du mètre : généra- tion, propagation	605
NISSOU. — Accumulateurs électriques (Sur les)	213
PARODI. — Electrification du Chemin de fer de Paris à Orléans	83
RAVUT, CAHEN, JANET, COURTOIS, VALENSI. — Observations sur la com- munication de M. Valensi	699
RIBAUD. — Fours électriques à haute fréquence	583
RISLER. — Tubes fluorescents (Présentation de). Radiations excitant la fluorescence	293
ROTH. — Pertes supplémentaires dans les machines électriques	483
SAGET. — Générateur moderne de rayonnement X	43
STOKVIS. — Connexion Scott utilisée pour l'alimentation de deux ré- seaux monophasés indépendants dans les transformateurs (Sur le diagramme de)	729
TRIBOT-LASPIÈRE. — Accumulateurs (Essais de véhicules à traction par). Programme	255
VALBREUZE (de). — Exposition de Physique et de T. S. F.	260
VALENSI. — Méthodes d'essais des appareils téléphoniques	671
VALETTE (de la). — Observations sur la communication de M. Tribot- Laspière	258
VILLARD. — Ampoules à rayon X (Sur les)	723

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIES

ARUNDEL COTTER. — Corporation de l'acier aux Etats-Unis, étude indus- trielle, économique et sociale, traduit de l'anglais avec l'autori- sation de l'auteur, adapté et commenté par M. André Aude....	
ASSIER DE POMPIGNAN. — Calcul tensoriel (Note sur le)	79
ASSOCIATION DES ANCIENS ÉLÈVES DE L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE DE GRENOBLE. — Congrès de la Houille blanche et des applications de l'électricité, tenu à Marseille, à l'occasion de l'Exposition colo- niale des 17-20 juin 1922	799
ASSOCIATION DES INGÉNIEURS SORTIS DE L'ÉCOLE DE LIÈGE. — Congrès scientifique international, organisé par l'Association, à l'occasion du 75 ^e anniversaire de sa fondation	799
BASIAUX (Paul). — Aménagement intégral et économique des forces hy-	

	PAGES
drauliques. Nouveau mode de collecteurs d'eau avec prises à des réservoirs d'altitudes différentes. Application à une chute de 1 950 mètres	788
BAYLE. — Statique graphique (Cours de)	798
BAYLE. — Résistance des matériaux (Cours de) appliquée aux machines, professé à l'Ecole spéciale des Travaux publics et à l'Ecole de Physique et Chimie de la Ville de Paris	783
BEGHIN. — Statique et dynamique	786
BEGHIN. — Règles à calcul Beghin (Traité théorique et pratique des). Règle de l'ingénieur et règle de l'officier de marine. Modes opératoires. Problèmes industriels. Tables et formules	167
BELLESIZE (H. de). — Radiotélégraphie (Etude de quelques problèmes de radiotélégraphie)	782
BERTRAND DE FONTVOLIANT. — Résistance des matériaux analytique et graphique. Théories générales, poutres droites isostatiques et hyperstatiques	798
BERTRAND DE FONTVOLIANT. — Résistance des matériaux (Les méthodes de la)	798
BLANC (A.). — Rayonnement (Principes scientifiques de l'Eclairage)	791
BLOCH (Eugène). — Les phénomènes thermoioniques	244
BLOCH (Eugène). — Théorie cinétique des gaz	783
BOILEAU (Charles). — Electrification générale du territoire (Un problème national)	784
BOREL (Emile) et DELTEIL (Robert). — Probabilités, erreurs	798
BOSLER (Jean). — L'évolution des étoiles	784
BOUSSE. — Dynamique générale	797
BOUSSE (H.). — Magnétisme et électricité (Cours de)	800
BOUTHILLON (Léon). — Radiocommunications (La théorie et la pratique de la)	793
BRICARD. — Cinématique et mécanismes	787
BRILLOUIN (Léon). — La théorie des Quanta et l'atome de Bohr	244
BROCA (Docteur André). — Optique physiologique (Leçons d'), professées à l'Institut d'optique théorique et appliqué	781
BROGLIE (Maurice de). — Les rayons X	244
BROGLIE (Maurice de). — Eléments isotopes (Exposé concernant les résultats actuels relatifs aux)	167
BUNET (P.). — Transformateurs (Les). Encyclopédie d'Electricité industrielle publiée sous la direction de M. Blondel	790
CAILLAUT (Roger) et BAUD (Camille). — Electricien (La technique du métier d')	799
CAPART (G.). — Protection (La) des réseaux et des installations électriques contre les surtensions	781
CARLO TOCHE. — Radiotéléphonie (La). Emission. Réception. Montage des postes d'amateurs. Applications	782
CARVALLO. — Electricité théorique (Traité d')	79
CAVAILLES (Henri). — Houille (La) blanche	787
CHAMPLY (René). — Electricité (L') à la campagne	790
CHIROL (M.). — Appareils de mesures électriques	783
CLAUSEL DE COUSSERGUES. — Electro-sidérurgique (L'). Fabrication de l'acier au creuset	792
CLÉMENT (C.). — Bobinages électriques (Construction des). Aide-mémoire du bobinier	784
COMITÉ NATIONAL DES RECHERCHES DE WASHINGTON. — Constantes fondamentales et facteurs de conversion (formulaires)	332
COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE EN SUCCESSION A LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PHOTOMETRIE. — Recueil des travaux et compte rendu des séances	791
CONDUCHÉ (Auguste). — Progrès (Les) de la Métallurgie du cuivre. 792	
COUVRET (R.). — Congrès régional de l'Electrification des campagnes, les 7, 8, 9, 10 juin 1923, à Montpellier. Région économique. Office régional de l'énergie électrique. Compte rendu des travaux	784
CRAVERIE (Docteur A.) et DEMALDE (commandant S.). — Telefonía (La) a granda distanza ed i repetitori telefonici	794

DACREMONT (E.). — Electricité. Première partie : Théorie, production, transformation	799
DAMIENS (A.). — Isotopes (Les)	795
DARMOIS (E.). — Eclairage (L'). Solutions modernes des problèmes d'éclairage industriel	791
DAVAL. — Construction des réseaux d'énergie	793
DELALANDE (H.). — Essais des machines électriques. Installations des plates-formes d'essais. Interprétation des essais	797
DELASALLE. — Précipitation électrique de l'acide sulfurique dans les fumées et des poussières contenues dans les gaz des fours à pyrite	792
DRUMAU (Paul). — Théorie d'Einstein (L'évidence de la)	79
DUROQUIER. — T. S. F. (La) des amateurs. Télégraphie. Téléphonie.	781
EDDINGTON (A.-S.). — Théorie de la relativité (La) généralisée dans ses grandes lignes (espace, temps, gravitation). Exposé rationnel suivi d'une étude mathématique de la théorie. Traduit de l'anglais par M. Rossignol	785
FABRY (Charles). — Electricité (Eléments d')	786
FICHIOT (E.). — Marées (Les) et leur utilisation industrielle	790
FONTAINE (F.). — Compteurs (Les) électriques	797
FOURNIER (Georges). — Relativité (La) vraie et la gravitation universelle	783
GAISBERG. — Monteur électricien (Guide élémentaire du)	800
GRAFFIGNY (H. de). Dessinateur électricien (Manuel pratique du)	799
GRANIER (Jean). — Pertes d'énergie (Les)	795
GUÉRY (F.). — Relativité, cohésion, gravitation. électromagnétisme (Contraction de Lorentz)	796
GUIEU (P.) et BABEY (F.). Houille (La) blanche dans la petite industrie agricole et rurale	273
GUTTON (C.). — Télégraphie et téléphonie sans fil	331
GUTTON (C.). La lampe à 3 électrodes	244
HACKSPILL (Louis). Azote (L.). La fixation de l'azote atmosphérique et son avenir industriel	782
HARANG. — Electricité industrielle	79
ILIOVICI. — Electrotechnique (Cours d'), professé à l'Ecole des Travaux publics	247
JACQUINOT (O.). — Navigation intérieure. Canaux. Cours professé à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, par M. O. Jacquinot, revu avec la collaboration de M. F. Galliot	798
JOLIBOIS. — Chimie (Les méthodes actuelles de la)	792
JOUGUET (E.), RATEAU (A.) et DE SPARRE. — Coups de bélier (Etude théorique et expérimentale sur les) dans les conduites forcées.	790
JULIA. — Fonctions uniformes (Leçons sur les) à point singulier essentiel, isolé, professées au Collège de France	797
KENNELLY (A.-E.). Fonctions hyperboliques (Les applications élémentaires des) à la science de l'ingénieur électricien	785
KRETZSCHMAR (Von E.-F.). — Blei-Akkumulatoren (Die Krankheiten des)	792
LACONIN (Louis). — Thermodynamique (Cours de) et de théorie des moteurs	798
LEBLANC (Maurice). — L'arc électrique	244
LEMERAY (E.-M.). — Gravitation (Leçons élémentaires sur la) d'après la théorie d'Einstein	245
LEVASSEUR (Albert). — Métallurgies électrolytiques (Les) et leurs applications.	246
LÉVY-LAMBERT. — Chemins de fer à crémaillère, funiculaires et transports aériens (Cours de)	798
MAGONETTE (F.). — Electricité industrielle (Cours d'). Le courant continu. Notions physiques. Génératrices et Réceptrices. Accumulateurs. Distributions. Mesures	800
MALGORN (G.). — Radiotélégraphie et radiotéléphonie à la portée de tous	794
MAREC (Eugène). — Enroulements (Les) industriels des machines à courant continu et à courants alternatifs	245
MAREC (Eugène). — Force motrice (La) électrique dans l'industrie ..	40

	PAGES
MARIE (Ch.). — Constantes et données numériques de chimie, de physique et de technologie (Tables annuelles de)	245
MARIE (Robert). — Traction électrique (Manuel de l'apprenti et de l'amateur électricien)	273
MATHIS (A.-R.). — Essais des fils et câbles (Des) isolés au caoutchouc. 793	793
MAURAIN (Ch.). — Physique du globe (Annales de l'Institut de) de l'Université de Paris et du Bureau central de magnétisme terrestre	786
MAURAIN (Ch.). — Physique du globe	796
MAURER (P.). — Calcul pratique des conducteurs dans les installations électriques (sur réseaux publics et privés)	792
MAURER (P.). — Entrepreneur électricien (Aide-mémoire et schémas de l')	800
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — Annuaire 1923	273
MONTORIOL (E.). — Télégraphiques (Appareils et installations)	246
MOUREU (Charles). — Chimie (La) et la guerre	783
NIELS BOHR. — Spectres (Les) et la structure de l'atome (3 conférences). Traduit sur le manuscrit de l'auteur, par M. Corvisy. ...	796
OBOUKHOFF (Professeur). — Wave length (The optimum) its application to the determination of the coefficient of dispersion of electromagnetic wave, the optimum effective height of an antenna in some particular cases	795
OCAGNE (Maurice d'). — Géométrie projective (Notions sommaires de) à l'usage des candidats à l'Ecole polytechnique	797
OCAGNE (Maurice d'). — Nomographie (Traité de). Etude générale de la représentation graphique cotée des équations à un nombre quelconque de variables. Applications pratiques	797
PACORET (Etienne). — Forces (Les) hydrauliques et les usines hydro-électriques. Aménagement des chutes d'eau et des centrales électriques	781
PARISELLE (H.), professeur à la Faculté des Sciences de Lille. Instruments d'optique	781
PEASLEE (D.-A.). — Tuyères de turbines à gaz (Essai d'une étude sur les pertes par frottement)	274
PEEK (F.-W.). — Dielectric phenoma in high voltage engineering... 795	795
PETIT (G.-E.) et BOUTHILLON (Léon). — T. S. F. La Télégraphie sans fil, la téléphonie sans fil, applications diverses	794
REMAUR (Jean). — Télégraphie et téléphonie sans fil (Notions élémentaires de) et construction pratique de postes récepteurs	794
REYNAUD-BONIN (E.). — Radiotélégraphie, radiotéléphonie, radioconcert	274
ROSENBERG (E.). — Electricité industrielle (L') mise à la portée de l'ouvrier. Manuel pratique	275
ROUCH (J.). — Atmosphère (L') et la prévision du temps	795
ROUCH (J.). — Météorologie (Manuel pratique de)	795
ROUSSEL (Joseph). — Téléphonie sans fil (Comment recevoir la)	794
ROUX (Gaston). — Electricien (Formulaire de l') et du mécanicien 245	245
ROY (Louis). — Electrodynamique (L') des milieux isotropes en repos, d'après Helmholtz et Duhem	274
RUSS (Von E.-F.). — Elektro-Metallofen (Die)	787
SCHILS (J.). — Téléphoniques (Installations). Guide pratique à l'usage du personnel des P. T. T. et des monteurs électriciens	331
SCHULZ (Ernest). — Maladies (Les) des machines électriques	245
SOULIER (Alfred). — Accumulateurs électriques (Les)	792
SOULIER (Alfred). — T. S. F. (Comment entendre chez soi la T. S. F. 794	794
SILBERSTEIN (Ludwick). — Théorie électromagnétique de la Lumière (Eléments de la)	796
SWYNGEDAuw (R.). — Monteur électricien (Guide du)	800
SYNDICAT PROFESSIONNEL DES PRODUCTEURS ET DISTRIBUTEURS D'ENERGIE ÉLECTRIQUE. — Annuaire 1923	799
SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES. — Industrie (L') électrique française à la Foire de Paris (10-15 mai 1923)	799
THOMAS (H.). — Télégraphie électrique (Traité de)	331

	PAGES
THOMSON (J.-J.). — Rayons d'électricité positive et leur application aux analyses chimiques (Les)	167
TRIPPIER (Henri). — Fonctions circulaires (Les) et les fonctions hyperboliques étudiées parallèlement en partant de la définition géométrique	797
VARINOIS. — Soudure électrique (La). Soudure par résistance, soudure à l'arc, machines à souder, exemples de travaux	275
VIARD (Henri). — Télégraphie et téléphonie sans fil (Vocabulaire en cinq langues de) avec les définitions officiellement adoptées et un répertoire alphabétique	794
VIDMAR (Milan). — Machine électrique (La construction économique de la). Traduit de l'allemand par Schepse	790
VIEILLARD. — T. S. F. extérieure (Etude théorique de la). Longueur d'onde et propagation	782
VIGNERON (Eug.). — Mesures électriques et Essais de machines (Cours de), professé à l'Ecole spéciale des Travaux publics	797
VINOT (Maurice). — Radiophonie (Contribution à l'étude des applications de la)	793
VITUS (Fernand). — Téléphonie sans fil (A B C de)	794
WALKER (Miles). — Machines dynamo-électriques (Calcul et spécification des), traduction française par M. J. Keraly	273
WIRELESS PRESS. — Wireless telegraphy and telephony (The year book)	795
ZEEMAN (Docteur P.). — Phénomènes magnéto-optiques	244

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

BARBAGELATA. — Pertes dans le fer (Méthode industrielle pour déterminer les)	276
BARTON et HAMBLETON. — Matériel de conversion utilisé dans les sous-stations d'énergie	206
BLAKE. — Transformateurs électrostatiques et coefficients d'accouplement	206
BORDEN. — Demande maximum (La mesure de la)	168
CARLAVERO. — Moteurs asynchrones (Le fonctionnement des) sous tension et fréquence variables	205
DELLA SALDA. — Autotransformateurs (Chute de tension des) et des régulateurs d'induction	204
DELLENBAUGH. — Ondes complexes (Analyse harmonique des)	206
DEL MAR (W.-A.). — Câbles sous papier pour basse tension (Températures de sécurité des)	78
DOHERTY et WILLIAMSON. — Courant de court-circuit des génératrices et moteurs d'induction	78
FASCETTI. — Pylônes (Le poids en fonction de la portée des)	277
FRETY et GILCHREST. — Isolateurs à suspension (Production moderne des)	276
HULL (Albert W.). — Magnétron ou tube à vide à haute fréquence, fonctionnement sous l'action d'un champ magnétique	278
KARAPETOFF. — Moteur d'induction monophasé (Equivalence des deux théories du)	277
LEWIS. — Ligne de transmission d'énergie (Essais sur une)	206
LOUGEE. — Parafoudre à oxyde et à pellicules. Essai de durée	78
MAC KINSTY. — Lignes de transmission d'énergie (Longues) à haute tension	168
MATTEINI. — Dynamos (Equations des courbes caractéristiques) ..	205
SMITH. — Régulation de la fréquence employée dans les buts de mesure	204
SORDINA. — Génératrice d'induction excitée par condensateurs	204
SORELLI. — Lignes d'alimentation (Nouveau système de) pour traction à courant continu	204
SPEED et ELMEN. — Propriétés magnétiques du fer pulvérisé et comprimé	205
STUBBINGS. — Compteur d'Electricité (L'erreur moyenne d'un)	277

	PAGES
WHITEHEAD et LEE. — Résistance électrique de l'air (Action des potentiels continus et influence de la température)	276
WOODHOUSE. — Distribution de l'énergie (La)	168

IL Y A 30 ANS

ARMAGNAT. — Ohmmètre Carpentier	248
BLONDEL. — Couplage des alternateurs (Sur les conditions du). 40,	80,
	168
BOVET (De). — Adhérence magnétique (Appareils à)	40
CANCE. — Usine d'éclairage électrique de la gare Saint-Lazare (Nouvelle)	168
CLAUDE. — Sécurité des distributions des courants alternatifs à haute tension (Moyens d'augmenter la)	787
DESROZIERS. — Transmission et distribution de la force motrice..	248
GUILLAUME. — Grandeurs électriques (Idées modernes sur les)	208
HESS, GERALDY. — Isolants hétérogènes	168
HILLAIRET. — Cémentation électrique du fer, par M. Garnier	332
HOSPITALIER. — Congrès international des Electriciens de Chicago, 1893. Programme	168
HOSPITALIER. — L'industrie électrique en Amérique	787
LEJEUNE. — Galvanomètre portatif Ducretet et Lejeune	332
MASCART. — Congrès de Chicago. Notes de voyage.	628
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — Instructions et circulaires sur l'établissement des canalisations sur les voies publiques et sur la réglementation des conducteurs sur la grande voirie nationale	628
NERVILLE (De). — Nouvelles installations du Laboratoire central...	332
PELLAT. — Décisions du Congrès de Chicago	279
PEYRUSSON. — Accumulateur Peyrusson, type Planté	208
PICOU (R.-V.). — Mise à la terre dans les distributions électriques.	80
VIOLLE. — Chaleur et lumière dans l'arc	279

Le Gérant : J. GUYOT.

Imp. Henriot, 20, rue Gerbert, Paris.

SOCIÉTÉ ALSACIENNE de Constructions Mécaniques

Usines à BELFORT (Terr. de), MULHOUSE (Haut-Rhin), GRAFFENSTADEN (Bas-Rhin)

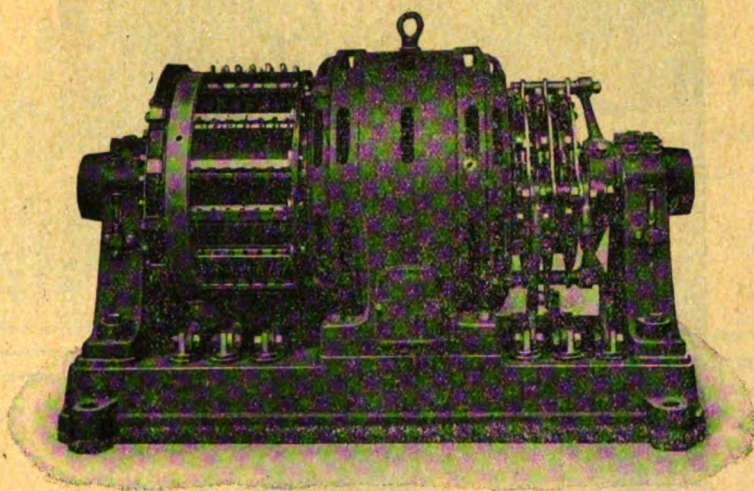
Maison à PARIS, 32, rue de Lisbonne (8^e)

Registre du Commerce : Belfort N° 3661

à LYON 13, rue Grôlée
à LILLE 67, rue de Tournai
à NANCY 21, rue St-Dizier
à MARSEILLE . 41, rue Sainte

UNIS-FRANCE

à ROUEN.... 7, rue de Fontenelle
à NANTES .. 7, rue Racine
à BORDEAUX 9, c^{de} du Chapeau rouge
à TOULOUSE 21, rue Lafayette



Convertisseur de fréquence à collecteur pour réglage de vitesse d'un moteur
d'induction actionnant un ventilateur

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Dynamos - Alternateurs - Groupes électrogènes - Transformateurs - Convertisseurs
Commutatrices - Redresseurs à vapeur de mercure - Tableaux de distribution - Moteurs
électriques de toute puissance et pour toutes applications - Commandes électriques
pour laminoirs - Machines d'extraction électriques - Tramways et locomotives élec-
triques - Appareillage haute et basse tension - Fils et câbles isolés pour l'électricité

Chaudières - Machines et turbines à vapeur
Moteurs à gaz et installations d'épuration des gaz

INSTALLATION COMPLÈTE
DE STATIONS CENTRALES ET DE SOUS-STATIONS DE TRANSFORMATION

AUTRES FABRICATIONS :

Machines soufflantes - Machines pour l'industrie textile - Machines et appareils pour
l'industrie chimique - Installation de chauffage industriel - Locomotives à vapeur
Machines-outils - Petit-outillage - Crics et Vérins UG - Bascules - Transmissions

ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ELECTRIQUES DE LYON ET DU DAUPHINÉ

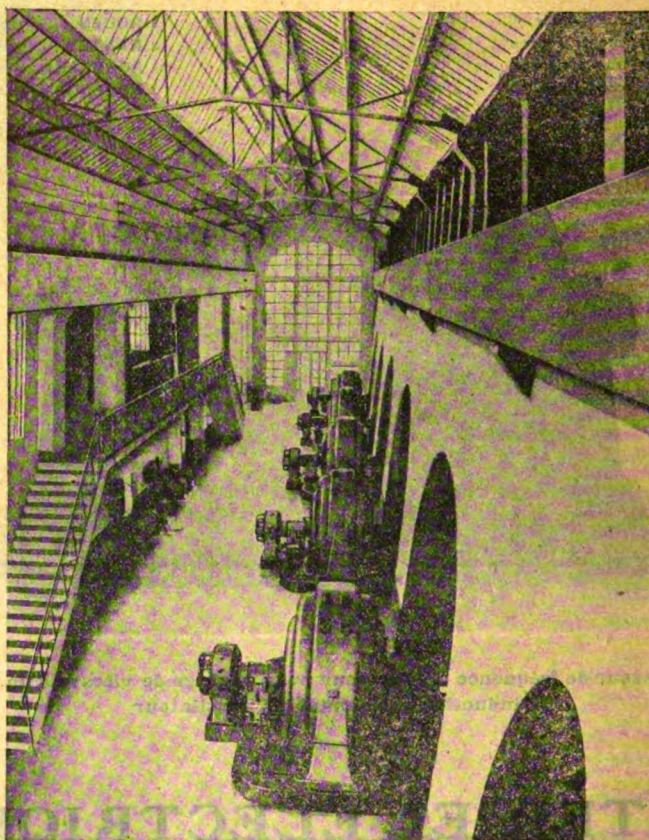
Matériel électrique Grammont - Appareillage Maljournal et Bourron

Capital social : 21 000 000 francs

SERVICES COMMERCIAUX : 10, rue d'Uzès & PARIS (2^e)

Téléph : Central 4-43, 21-85 : Gutenberg 00-54

USINES : 160-220, route d'Heyrieux & LYON Reg. du Commerce : Lyon 2 857.



Centrale hydro-électrique du Drac-Romanche

5 alternateurs triphasés 2800 kV-A, 5500 volts, 50 p/s, 300 t.mn.

ALTERNATEURS DE TOUTES PUISSANCES
TRANSFORMATEURS POUR ACCOUPLEMENT DIRECT AVEC TURBINES HYDRAULIQUES
à refroidissement naturel p^r toutes tensions jusqu'à 5 000 kw
— artificiel — 30 000 —
GENERATRICES ET MOTEURS A COURANT CONTINU
COMMUTATRICES, GROUPES CONVERTISSEURS DE TOUTE PUISSANCE
ET DE TOUTE NATURE
MOTEURS POUR LAMINOIRS ET MACHINES D'EXTRACTION
MOTEURS A GRANDE VITESSE POUR POMPES — VENTILATEURS
MATERIEL DE TRACTION. — MOTEURS ET EQUIPEMENTS
EQUIPEMENT COMPLET DE STATIONS CENTRALES
ET DE POSTES DE TRANSFORMATION

Agences à Lyon, Marseille, Toulouse, Grenoble, Bordeaux, Nancy, Nantes, Alger, Lille, Limoges et Bruxelles.

SOCIÉTÉ GRAMME

Anonyme au Capital de 3 500 000 Francs
Reg. du Commerce : Seine 29 522.

USINES :

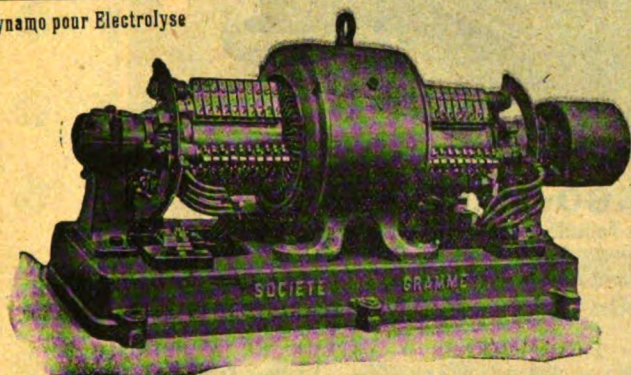
26, RUE D'HAUTPOUL, Paris
29, RUB D'HAUTPOUL, Paris
200, RUE DE PARIS, Pantin

Siège social :
26, RUE D'HAUTPOUL
PARIS (19^e)



Matériel à courant continu et alternatif

Dynamo pour Electrolyse



MANUFACTURE
DE
LAMPES
à incandescence

TÉLÉPHONE : NORD { 02-01
15-39

TÉLÉGRAPHE : GRAMME-PARIS

FORGES ET ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ELECTRIQUES de JEUMONT (Nord)

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 80 MILLIONS DE FRANCS

Siège Social : 75. Boulevard Haussmann. — PARIS

Reg. du Commerce : Seine 167 217.

USINES, ATELIERS, FONDERIES, ACIÉRIES, TRÉFILIERES,
LAMINOIRS, CABLERIE, MANUFACTURE D'ISOLANTS
à JEUMONT (Nord)

MATÉRIEL DE TRACTION ÉLECTRIQUE. — GROUPES MOTEURS-GÉNÉRATEURS ET
TURBO-ALTERNATEURS. — PONTS-ROULANTS. — TREUILS. — LOCOMOTIVES DE CANAUX
ET DE MINES. — MACHINES D'EXTRACTION ET TOUTES APPLICATIONS ÉLECTRO-
MÉCANIQUES. — CÂBLES ARMÉS. — FILS NUS ET ISOLÉS. — CAOUTCHOUC MANU-
FACTURE. — TUBES. — BOITES. — OBJETS MOULÉS.

DIVISION APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE. Usines et Ateliers :
194. avenue du Président-Wilson. LA PLAINE-SAINT-DENIS (Seine)

DIVISION CHARPENTE MÉTALLIQUE. BOULONNÉRIES :
Usines à FEIGNIES (Nord)

DIVISION LIMES et OUTILLAGE : Usines D'URLACH, 39, r. des Martyrs. PARIS
Usines à NANCY et à RENNES

AGENCES PRINCIPALES :

PARIS : 75. boulevard Haussmann.
(Cablerie), 49, Rue des Mathurins.
BORDEAUX : 3 bis, cours de Tournon.
DOUAI : (Cablerie), 40 ter, rue d'Arras.
EPERNON : Le Petit Prieuré.
LILLE : 7, rue du Pas.
LYON : 53, cours de la Liberté.
MARSEILLE : 39, rue Thubanneau.

NANCY : 23, rue Bassompierre.
(Cablerie), 53, rue du Faubourg Saint-Jean.
NANTES : 5, quai Fosse.
REIMS : 35 et 41, rue de Neufchatel.
ROUEN : 4 bis, quai du Havre.
SAINT-QUENTIN : 73, rue de Cronstadt.
VALENCIENNES : 3, rue du Bœuf.

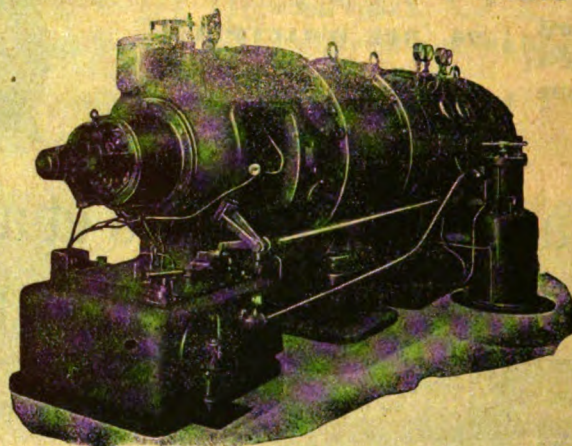
ANCIENS ÉTABLISSEMENTS SAUTTER-HARLÉ

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 8 000 000 FRANCS

Reg. du Commerce : Seine 104 728.

16 à 26, avenue de Suffren PARIS (XV^e)

UNIS
FRANCE



Téléphone
Saxe 11-55

TURBO-MACHINES

Groupes électrogènes à turbine radiale à double rotation système **Ljungström**
à très faible consommation de vapeur

pour les STATIONS CENTRALES et pour la PROPULSION ÉLECTRIQUE des NAVIRES

POMPES centrifuges COMPRESSEURS d'air

MACHINES ÉLECTRIQUES :: MOTEURS A VAPEUR ET A PÉTROLE
Compresseurs d'Air à Pistons — Appareils de Levage — Machines Frigorifiques

Ancienne Maison J. BRUNT et C^{ie}

COMPAGNIE CONTINENTALE

POUR LA FABRICATION

DES COMPTEURS ET AUTRES APPAREILS

Société Anonyme au Capital de 12 500 000 francs



SIÈGE SOCIAL : 17, Rue d'Astorg, PARIS
(Ci-devant : 9, Rue Pétreille)

Reg. du Commerce : Seine 31 730.

Téléph. : ELYSÉE { 34-65 Adresse Télégraphique :
36-59 COMPTEURS - BRUNT - PARIS

Usine à COLOMBES : 432, rue de Rueil

Téléphone : WAGRAM 91-24

COMPTEURS D'ÉLECTRICITÉ

POUR COURANT CONTINU

ET POUR COURANT ALTERNATIF, MONOPHASE, DIPHASE ET TRIPHASE

COMPTEURS A DÉPASSEMENT A DOUBLE TARIF -- COMPTEURS D'ÉNERGIE RÉACTIVE
COMPTEURS A INDICATEUR DE MAXIMUM

FILTRES A AIR POUR TURBO-DYNAMOS

FILTRES A.R.

Ininflammables

FONCTIONNEMENT LE PLUS SÛR LE PLUS ÉCONOMIQUE

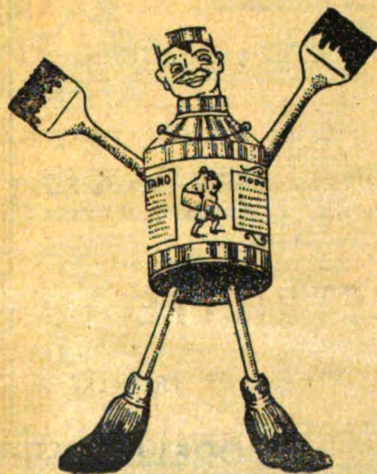
M. COMBEMALE — 12, Rue Curton, CLICHY, (Seine)
Ingénieur-Constructeur Téléph. Marcadet 14-06

Reg. du Commerce : Seine 149 927.

VERNIS ISOLANTS == "NEUTRALAQUE"

A L'ÉTUVE
== A L'AIR

pour Transformateurs et Alternateurs
pour Imprégnation et Finition

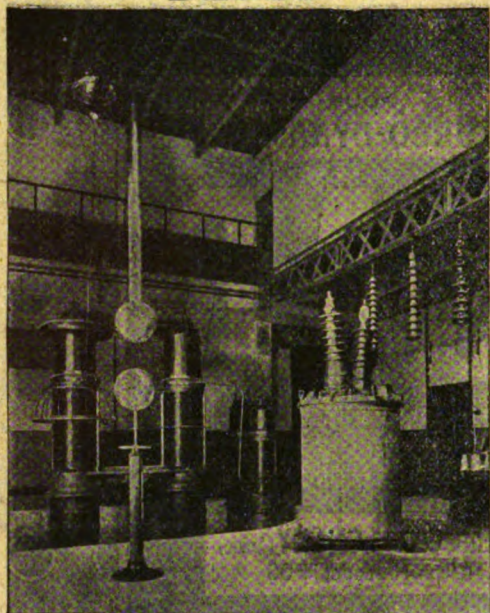


Les fils de H. ROUTTAND

133, Avenue Jean-Jaurès, 133
AUBERVILLIERS (Seine)

RENSEIGNEMENTS, ÉCHANTILLONS :
s'adresser au service Haute Tension.

DELLE



ATELIERS DE
CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE

DELLE

S. A. au Capital de 6 000 000 Fr.

Reg. du Commerce : Seine 18 858.

APPAREILLAGE
ÉLECTRIQUE
HAUTE & BASSE TENSION

Laboratoire d'essais
à 500 000 Volts
(Usines de Villeurbanne)

PARIS — 28, Boulevard de Strasbourg, 28 — PARIS

BREVETS D'INVENTION

ASSOCIATION FRANÇAISE DES INGÉNIEURS — CONSEILS En matière de Propriété industrielle FONDÉE en 1884

EXTRAITS DES STATUTS

ART 2. — L'Association a pour but : 1° De grouper les Ingénieurs-Conseils en matière de propriété industrielle qui réunissent les qualités requises d'honorabilité, de moralité et de capacité ; 2° de veiller au maintien de la considération et, de la dignité de la profession d'Ingénieur-Conseil en matière de propriété industrielle.

LISTE DES MEMBRES TITULAIRES

ARMENGAUD Aîné + & CH. DONY	Ingr ^e civil des Mines Licencié en Droit Ingénieur des Arts et Manufactures Licencié en Droit	Successeur de son père Successeur de ARMENGAUD Aîné Licencié en Droit	21, boulevard Ponceau Paris Garebourg 11-91	Henri ELLUIN	Ancien Elève de l'École Polytechnique. Ingénieur en l'École supérieure d'Et. Licencié en Droit.	Successeur de MM DUPONT & ELLUIN	42, bd Bonne-Nouvelle Paris — Gât. 10-90
ARMENGAUD Jeune	Ancien Elève de l'École Polytechnique. Licencié en Droit	Successeur de son père	21, boulevard Ponceau Paris — Nord 08-30	G FAUGE			118, boulevard Voltaire Paris — Eux. 19-92
E BERT + & G. de KERAVENANT +	Ingénieur des Arts et Manufactures Docteur en Droit Ingénieur des Arts et Manufactures		1, boulevard Saint-Denis Paris Archives 30-42	J FAYOLLET & P LOYER + +	Ingénieur des Arts et Manufactures Licencié en Droit Ingénieur des Arts et Manufactures Licencié en Droit		18, rue de Mogador Paris Garebourg 55-63
C BLETRY O +	Ancien Elève de l'École Polytechnique Licencié en Droit	Successeur de MM BLETRY Frères	2, boulevard de Strasbourg Paris — Nord 21-93	GERMAIN		S de MM. FREYDIER, DUBREUIL & JANICOT	31, r. de l'Alsace-Ville Lyon — Barre 7-82
G. BOUJ +	Ancien Elève de l'École Polytechnique Ingénieur de l'École supérieure d'Electricité	Successeur de MM. BORAME & JULIEN	8, boulevard de Martin Paris — Nord 20-97	F. HARLE & G. BRUNETON + +	Ingénieur des Arts et Manufactures Ingénieur des Arts et Manufactures	S de G. de MESTRAL & F HARLE	21, r. La Rochefoucauld Paris — Trud. 35-28
B. BRANDON H. BRANDON G. MINOYOT & L. RINUY	Ingénieur des Arts et Métiers Dipl. du Conserv. Nat. des Arts et Métiers		79, rue de Provence Paris — Trud. 11-58	H JOSSE + & L. JOSSE +	Ancien élève de l'École Polytech.		17, bd de la Madeleine Paris — Gât. 16-61
A. de CARSLADE + + & P. REGIMBEAU + +	Ancien Elève de l'École Polytechnique Ingénieur civil P. et C. Licencié en Droit		72, rue Cambes, Paris Lévy 24-48	A LAVOIX + & L. MOSES	Ingénieur des Arts et Métiers Ingénieur des Arts et Manufactures		2, rue Elzévir Paris Trud. 22-22 et 68-68
CASALONGA + +	Licencié en Droit	Successeur de son père	13, rue des Halles Paris — Central 81-92	A MONTEILHET + +	Ancien Elève de l'École Polytechnique		90, bd Richard-Lenoir Paris — Eux. 19-33
CHASSEVENT & H. CLEBG	Docteur en Droit Ancien Elève de l'École Centrale	Successeur de son père Cabinet CHASSEVENT	11, boulevard de Magenta Paris — Nord 30-31	G. PROTTE +	Ingénieur des Arts et Manufactures	Successeur de M. BERTIN	38, boulevard de Strasbourg Paris — Nord 20-15
P. COULOMB	Ingénieur des Arts et Manufactures Licencié en Droit	Successeur de MM. THÉRIER frères	58, rue de Reims, Paris Eux. 16-31	CH. WEISMANN + O	Ingénieur des Arts et Manufactures	Ancien Cabinet WEISMANN & MARX	84, rue d'Amsterdam Paris — Gât. 11-16
C. DANZEB	Ancien Elève de l'Université de Leyde	Successeur de son père	20, rue Vignon, Paris Central 81-71				

L'Association ne se chargeant d'aucun travail, prie de s'adresser directement à ses Membres.

MARQUES

MODÈLES

CHAUVIN & ARNOUX

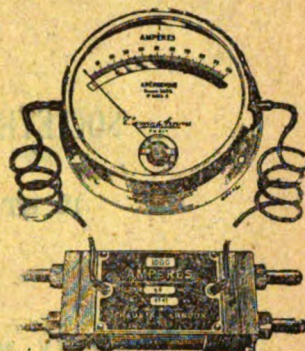
Ingénieurs-Constructeurs.

Grands Prix : Paris, 1900 ; Liège, 1905. Médailles d'Or : Bruxelles, 1897 ; Paris, 1899 ; Paris, 1900 ; Saint-Louis, 1904. Hors concours : Milan, 1906.

186, Rue Championnet. — PARIS. R. C. : Seine 64 309.



Ohmmètre pour la mesure rapide des résistances
De 0,01 ohm à 20 mégohms. — De 1 ohm à 200 mégohms.



Voltmètres et ampèremètres de précision
apériodiques, à sensibilité variable.

ENVOI FRANCO, SUR DEMANDE, DU NOUVEAU TARIF SPÉCIAL AUX APPAREILS DE TABLEAU



EN VENTE A LA « R. G. F. »

LE RÉSEAU D'ÉTAT

Reconstitution des Réseaux de Transmission d'Énergie électrique
dans les Régions envahies.

*Compte rendu des Travaux effectués par la Commission technique
des Sociétés d'Énergie électrique.*



Un volume format 27 cm × 18 cm, 336 pages, 231 figures.

Prix broché 30 francs

EN VENTE à la *Revue générale de l'Electricité*, 12, Place de Laborde, PARIS (VIII^e)

CAMRON (V.). — Les échanges franco-américains. Un volume, 22 cm × 14 cm, 44 pages, 0,75 fr.

CANIMATI (C.). — L'échauffement et la ventilation des machines électriques de grande puissance. Un volume, 22 cm × 14 cm, 40 pages, 2 fr.

DALEMONT (J.). — L'usure anormale des turbines. Un volume, 22 cm × 14 cm, 61 pages avec planches, 2,50 fr.

DEVAUX-CHARBONNEL. — Le télégraphe et la traction monophasée. Une brochure, 28 cm × 22 cm, 40 pages, 1 fr.

KORDA. — La séparation électromagnétique et électrostatique des minerais. Un vol., 22 cm × 14 cm, 216 pages, 6 fr.

PAWŁOWSKI (A.). — Annuaire de la Houille blanche (1922-1923). Un volume, 28 cm × 22 cm, 212 pages, 7 cartes, cartonné 16 fr.

POINCARÉ (H.). — Conférences sur la télégraphie sans fil 1919. Un volume, 22 cm × 14 cm, 86 pages, 15 figures, 2 fr.

ROUTIN (J.-L.). — Le réglage des groupes électrogènes. Un volume, 22 cm × 14 cm, 152 pages, 45 figures, 5 fr.

Statistique des Distributions d'Énergie électrique en France, publiée par le Ministère des Travaux publics. Un volume, 52 cm × 32 cm, prix 30 fr., à nos bureaux.

DE VALBRUZE (R.). — Notions sommaires d'Electrotechnique. Une brochure, 22 cm × 14 cm, 178 pages, 6 fr.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS

12 ET 14, RUE DE STAËL, PARIS (XV^e)

Le *BULLETIN MENSUEL* de la SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS publie le compte rendu complet des Communications faites au cours de ses *Réunions ordinaires* qui ont lieu le 1^{er} MERCREDI de chaque mois, ainsi que des informations et l'analyse des travaux récents et les plus intéressants de France et de l'étranger. Il forme annuellement un très beau volume 23 cm × 18 cm de 800 pages environ.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le Bulletin.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les manuscrits non insérés ne sont pas rendus.

Les Auteurs qui désireraient des tirages à part devront le faire connaître en renvoyant leurs épreuves corrigées.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN

(à partir de janvier)

Paris, 60 fr. — Départements et Union postale, 64 fr.

Prix du numéro: 8 fr.

PRIX DE LA 1^{re} SERIE:

17 volumes 400 fr.

PRIX DE LA 2^e SERIE:

10 volumes 200 fr.

On s'abonne aux bureaux de la *Revue générale de l'Electricité*, 12, Place de Laborde, Paris (8^e) et dans toutes les librairies de France et de l'Etranger.

Pour ce qui concerne la rédaction du BULLETIN et tous autres renseignements s'adresser au Secrétariat de la Société, 12 et 14, rue de Staël, à Paris (15^e).

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

Reconnue d'utilité publique par décret du 7 Décembre 1886.

SIEGE SOCIAL

12 ET 14, RUE DE STAEL, PARIS (XV^e)

Extrait des Statuts.

Article premier. — La Société française des Electriciens a pour but :

1° De centraliser, pour leur étude et leur discussion, les renseignements et les documents concernant les progrès de l'Electricité ;

2° De favoriser la vulgarisation et le développement de l'Electricité par tous les moyens. A cet effet, elle exerce son action par des réunions, des conférences, des publications, des dons en instruments ou en argent, aux personnes travaillant à des recherches ou entreprises scientifiques qu'elle aurait provoquées ou approuvées ;

3° D'établir et d'entretenir des relations suivies et de solidarité entre les divers membres, français ou étrangers, de la Société.

Art. 3. — Pour devenir membre de la Société, il faut :

Adresser au Président une demande écrite appuyée par deux Membres de la Société ;

Etre élu en séance, à la majorité des voix.

Les Sociétés et Compagnies scientifiques et industrielles peuvent, sur l'avis motivé du Comité, figurer parmi les Membres de la Société française des Electriciens. Elles sont alors représentées dans les actes de la Société par un délégué spécial.

Tout Membre ayant fait don à la Société d'une somme d'au moins 1 000 fr. reçoit la qualité de donateur.

Art. 4. — Tous les Membres de la Société, sauf les Membres d'honneur, payent une cotisation annuelle dont le minimum est fixé à 50 fr.

Extrait du Règlement.

Art. 3. — Le paiement de la première cotisation doit être effectué par chaque membre nouveau, immédiatement après son admission. La cotisation de l'année en cours est due, quelle que soit la date de l'admission.

Art. 4. — Le paiement des cotisations suivantes devra être effectué du 1^{er} janvier au 30 juin.

Art. 5. — Les quittances seront détachées d'un registre à souche et signées du Trésorier.

Art. 6. — En cas de non-paiement d'une cotisation échue et réclamée, l'envoi des publications est suspendu.

Art. 7. — Tout membre en retard de deux années pour le paiement de ses cotisations sera, après un dernier avertissement, considéré comme ne faisant plus partie de la Société.

Art. 8. — Toute démission donnée ne sera valable qu'après acquittement des cotisations dues ; sinon, la radiation sera prononcée.

Pour les demandes d'admission et tous renseignements, s'adresser au SECRÉTARIAT
12 et 14, RUE DE STAEL, à Paris (XV^e)

GEOFFROY & DELORE

CABLES ÉLECTRIQUES

CLICHY (Seine)

Téléph. : Marcadet 11.58

28, Rue des Chasses.

Téléph. : Marcadet 03.71

UNIS FRANCE

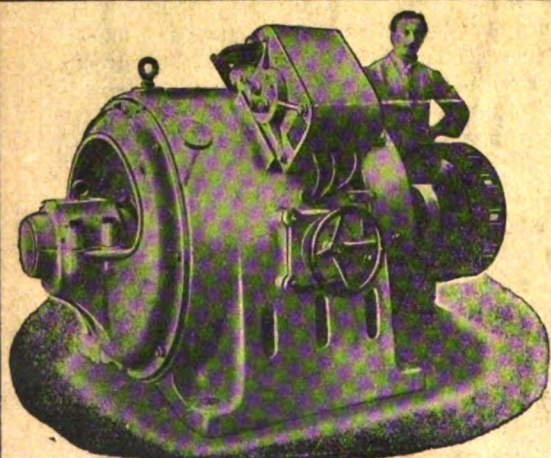
ACCUMULATEURS

ELECTRIQUES

FULMEN

Bureaux et Usine : à Clichy, 18, Quai de Clichy.

Reg. du Commerce. : Seine 5 840.



MOTEUR BOUCHEROT " ALPHA "

MAISON BRÉGUET

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 8 000 000 FR

Reg. du Commerce : Seine 108 676.

Siège social, 19, rue Didot, PARIS (14^e)

Service commercial, 34, rue de Châteaudun, PARIS (9^e)

Usines : PARIS - DOUAI - DEVILLE-les-ROUEN

Moteurs asynchrones

système **BOUCHEROT**

sans bagues, sans frotteurs

sans enroulements, tournants,

spécialement robustes

Groupes électrogènes jusqu'à 1 500 kw

avec

TURBINES MULTICELLULAIRES A ENGRENAGES

de faible consommation

TURBO-POMPES

Installations

générales du

VIDE

avec l'**ÉJECTAIR**
BRÉGUET-DELA PORTE

MOTO-POMPES

CONDENSATIONS

par mélange,

par surface

UNIV. OF MICH.

AUG 11 1924

BOUND

UNIVERSITY OF MICHIGAN

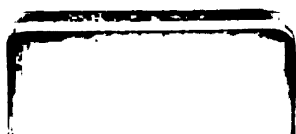


3 9015 07599 2878

UNIV. OF MICH.

AUG 11 1924

BOUND



UNIV. OF MICH.

AUG 11 1924

BOUND

UNIVERSITY OF MICHIGAN



3 9015 07599 2878

